

Seguimiento de la productividad forrajera mediante teledetección: desarrollo de una herramienta de manejo para sistemas de producción ganaderos

*Tesis presentada para optar al grado de
Doctor de la Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias*

GONZALO GRIGERA

Ingeniero Agrónomo – UBA 2003

Director: MARTIN OESTERHELD

Consejero de estudios: ESTEBAN JOBBAGY

Escuela para Graduados Alberto Soriano

Facultad de Agronomía

Universidad de Buenos Aires

2011

JURADO DE TESIS

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Martín Oesterheld

CONSEJERO DE ESTUDIOS:

Dr. Esteban Jobbagy

JURADOS:

Dr. Ana M. Cingolani

Dr. Mónica Agnusdei

Dr. Heriberto Díaz Solís

Fecha de defensa de la tesis: 7 de diciembre de 2011.

Les dedico esta tesis:
A mi papá, con quien aprendí a disfrutar del campo y la naturaleza
A mi mamá, que me motivó a estudiarlos
A mi director, Martín, que me enseñó cómo hacerlo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a mi director, Martín Oesterheld, por su confianza y generosidad, que además de permitirme disfrutar del doctorado me resultaron profundamente formativas.

A Esteban Jobbagy por sus valiosos consejos y actitud siempre positiva frente al proyecto.

Muy especialmente a Fernando Pacín, que me abrió las puertas de su casa, su familia y su trabajo, y me enseñó mucho de campo y varias otras cosas.

A los asesores y productores de la zona Sudoeste de AACREA y del Grupo Crea Lamadrid en particular, que me invitaron a participar de varias reuniones en sus empresas, donde siempre yo aprendí mucho más que ellos.

A Steve Running y los técnicos y estudiantes del NTSG en la Universidad de Montana donde pasé unos meses muy significativos para la tesis y como experiencia personal. Muchas gracias también a Susana y Fernando que en ese viaje me recibieron con tanta calidez en su casa en Lincoln, NE.

A Constanza Caride y Martín Durante que me ayudaron tanto en los dos primeros Capítulos de la tesis, Coni con las primeras versiones “inestables” del Segf y Martín con los muestreos de fPAR en los trigos de Azul.

A Juan Pablo Guerschman, Gervasio Piñeiro, Roxana Aragon y Mariano Oyarzabal, a quienes miré y consulté permanentemente durante el doctorado.

A Dolores Arocena, Federico del Pino, Mercedes Vasallo, Luciana Porfirio, Malena Ferro, Víctor Suárez, Lucía Franchino, Agustín Giorno, Hernán Dieguez, Germán Baldi, que me ayudaron mucho en el laboratorio y en el campo siempre con la mejor onda.

A Ignacio Oesterheld, Roberto Tornese, Santiago Veron, Omar Scheneiter, Oscar Bertín, y los técnicos de ganadería de INTA Pergamino, que me ayudaron y facilitaron el experimento en Pergamino.

A Susana Perelman por su confianza y a José Paruelo por sus charlas en los almuerzos del LART.

A Mariano Battista, por apoyarme para terminar la tesis.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
SIGLAS Y ABREVIATURAS.....	XIII
RESUMEN.....	XIV
ABSTRACT.....	XV
TÍTULO.....	XVI
CAPÍTULO 1. Introducción General.....	1
1.1 Los sistemas de producción ganaderos.....	1
1.2 Estimación y seguimiento de la PF	3
1.3 Estimación de la fRFAA de pasturas y cultivos a partir de variables espectrales	4
1.4 Ecofisiología de la EUR antes situaciones de estrés	6
1.5 Objetivos e hipótesis.....	7
CAPÍTULO 2. Diseño e implementación de un sistema de seguimiento de la productividad forrajera.....	9
2.1 Introducción.....	9
2.2 Metodología.....	11
2.2.1 Descripción de la zona y los sistemas de producción	11
2.2.2 El sistema de seguimiento forrajero.....	12
2.2.3 Evaluación de la utilización por usuarios	14
2.3 Resultados	14
2.3.1 Evaluación de las estimaciones de PF	14
2.3.2 Bases del sistema: calibración y evaluación de la EUR	15
2.3.3 Seguimiento de la productividad forrajera.....	17
2.3.4 Utilización por los productores y asesores.....	20
2.4 Discusión.....	23
CAPÍTULO 3. Estimación de la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada a partir de índices de vegetación.....	29
3.1 Introducción.....	29
3.2 Metodología.....	31
3.2.1 Descripción del sitio y selección de lotes.....	31
3.2.2 Mediciones a campo.....	32
3.2.3 Imágenes satelitales.....	33
3.2.4 Procesamiento y Análisis.....	33
3.3 Resultados	34
3.4 Discusión.....	42
CAPÍTULO 4. Variabilidad de la Eficiencia en el Uso de la Radiación de pasturas consociadas ante variaciones de disponibilidad de recursos, manejo, y escala temporal	46
4.1 Introducción.....	46
4.2 Metodología.....	48
4.2.1 Descripción del sitio y la pastura	48
4.2.2 Diseño experimental.....	49
4.2.3 Mediciones y escalas temporales	51
4.2.4 Estimación de la PF.....	53
4.2.5 Estimación de la fRFAA.....	53
4.2.6 Análisis de la EUR.....	55
4.2.7 Agua en el suelo.....	56
4.3 Resultados	57
4.4 Discusión.....	69

4.4.1	Impacto relativo de déficits de la disponibilidad de recursos y del manejo de la defoliación sobre la fRFAA y la EUR. Hipótesis asociada al primer objetivo	69
4.4.2	Efecto de la escala temporal sobre la variabilidad de la EUR. Hipótesis asociada al segundo objetivo	73
4.4.3	Implicancias	74
CAPÍTULO 5.	Discusión General	75
5.1	Mejoras al sistema de seguimiento forrajero	76
5.2	El área foliar y la fRFAA	78
5.3	El estrés hídrico y la eficiencia en el uso del agua	80
5.4	Extrapolabilidad de las calibraciones de EUR	81
5.5	La radiación difusa	82
5.6	Futuros pasos	82
5.6.1	Cuestiones metodológicas - ecofisiológicas	82
5.6.2	Transferencia, adopción e impacto del sistema	83
5.7	Comentarios finales	84
6	BIBLIOGRAFIA	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Fecha media, duración en días y suma térmica de los 18 períodos de rebrote para los que se estimó la PF. Las fechas de cosecha fueron las mismas para pasturas de loma y bajo.	15
Tabla 2.2. Encuesta realizada a los asesores de los ocho grupos de la zona sudoeste de AACREA. Los asesores contestaron la encuesta por ellos mismos y por los productores a los que asesoran.....	23
Tabla 3.1. Fórmulas de cálculo de los distintos índices de vegetación. ρ_{red} : reflectancia en la longitud de onda del rojo, 620-670 nm; ρ_{nir} : reflectancia en la longitud de onda del infrarojo cercano, 841-876 nm, ρ_{blue} : reflectancia en la longitud de onda del azul, 459-479 nm. Los parámetros del IVM son G (<i>gain factor</i>)=2.5, C1 y C2 son correcciones de aerosoles (C1=6 y C2=7.5). L es el ajuste por el color bajo el canopy (<i>canopy background adjustment</i> , L=1). Para el SAVI _{L=1} L=1, y para el SAVI _{L=0.05} L=0.05.....	34
Tabla 3.2. Ubicación, fecha, valor promedio, número de submuestras (N) y coeficiente de variación de las estimaciones de fRFAA realizadas con la barra de interceptación de radiación en cada estación de muestreo definida por un píxel MODIS de 5.3 ha.....	35
Tabla 4.1. Escalas temporales de análisis del experimento. Entre paréntesis se indica la duración en días de cada período. Decádico: período de revisita al experimento para realizar mediciones, duración promedio 12 días. Rebrote: período entre la aplicación de los tratamientos de defoliación, duración promedio 45 días. Estación: período de 2 rebrotes correspondientes a cada estación del año, duración promedio 90 días.....	52
Tabla 4.2. ANVA de la composición de la materia seca verde total para los 8 períodos de rebrote, expresada como porcentaje de festuca sobre el total de la pastura (festuca + alfalfa)). Los casos con diferencias significativas están en negrita, y se presentan las diferencias mínimas significativas (DMS).....	62
Tabla 4.3. ANVA de la eficiencia en el uso de la radiación de la pastura para los 8 períodos de rebrote. En negrita se destacan los casos en que hay diferencias significativas.....	63
Tabla 4.4. ANVA de la fracción de radiación fotosintéticamente absorbida de la pastura para los 8 períodos de rebrote. En negrita se destacan los casos en que hay diferencias significativas.....	64
Tabla 4.5. ANVA (a) y comparación de medias (b) de la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) y de la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA) anual de la pastura para los tratamientos de disponibilidad de recursos y de defoliación. En negrita se destacan los casos en que hay diferencias significativas.....	65
Tabla 4.6. Coeficiente de determinación simple (R^2) de la relación productividad forrajera - radiación fotosintéticamente activa absorbida para tres escalas temporales. Los valores simulados son una referencia que representa los cambios de R^2 debidos exclusivamente a aumentos de variabilidad en PF. Los valores observados son los obtenidos con los datos reales de campo. La diferencia entre ambos representa la variabilidad de la EUR <i>per se</i>	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Flujo de energía simplificado de un sistema de producción ganadero con base pastoril. RFA, radiación fotosintéticamente activa incidente; RFAA, radiación fotosintéticamente activa absorbida por la pastura (puede ser estimada mediante teledetección); PB, productividad primaria bruta; RP, respiración de la pastura; PR, productividad subterránea; PF, productividad forrajera (también productividad primaria neta aérea); NU, forraje no utilizado; NA, material no asimilado y excretado por el ganado; RG, respiración del ganado; MO, materia orgánica del suelo (antes de aportar a la MO la PR, NU y NA entran en compartimentos de otros animales y microorganismos no detallados en este diagrama); PA, productividad animal exportada del sistema de producción ganadero. El recuadro punteado indica los límites del sistema de producción ganadero. El modelo de Monteith o de la EUR (eficiencia en el uso de la radiación) se extiende a la izquierda de la figura, desde RFA hasta PF. Los subsidios de energía incorporados con el manejo (combustible, fertilizantes, pesticidas, etc) permiten, en general, reducir la magnitud de los flujos de pérdidas, como la respiración y la energía no asimilada. La suplementación con grano o concentrados incrementa el flujo de de PF que ingresa al compartimento del ganado. En la figura los tamaños de los flujos no guardan una proporcionalidad con la realidad.	2
Figura 2.1. Diagrama de flujo de los principales procesos de cálculo del sistema de seguimiento de la productividad forrajera. El algoritmo principal está basado en la lógica de la eficiencia en el uso de la radiación (EUR). Algunos datos de entrada son actualizados mensualmente (ícono de varias capas) y otros con menor frecuencia (íconos de una sola capa), por ejemplo el uso anual es actualizado anualmente y los coeficientes de EUR son actualizados solo si se genera nueva información al respecto. IVN, índice de vegetación normalizado; Calidad IV, información de calidad de las imágenes satelitales (presencia de aerosoles y/o nubosidad); fRFAA, fracción de la radiación fotosintéticamente activa incidente absorbida por la vegetación.	14
Figura 2.2. Estimaciones de productividad forrajera (derivada de cosechas de biomasa) y de radiación fotosintéticamente activa absorbida (derivada del índice de vegetación normalizado, IVN, del sensor MODIS y de la radiación fotosintéticamente activa incidente) para cuatro pasturas de loma (panel superior) y cuatro pasturas naturalizadas de bajo (panel inferior). 16	16
Figura 2.3. Calibraciones entre estimaciones de productividad forrajera (PF, derivada de cosechas de biomasa) y radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA, derivada del índice de vegetación normalizado, IVN, del sensor MODIS y de la radiación fotosintéticamente activa incidente). Cada punto es la PF y RFAA promedio, en cada fecha, de los cuatro sitios de la figura 2.2.	17
Figura 2.4. Relación entre los valores observados y predichos de productividad forrajera (PF). Los valores observados no formaron parte de la generación de los modelos utilizados para predecir la PF. (a) Pasturas de loma, (b) Pasturas naturalizadas de bajo.	17
Figura 2.5. Productividad forrajera diaria promedio de todos los lotes con pasturas de loma y con pasturas naturalizadas de bajo del grupo CREA Lamadrid.	18
Figura 2.6. Productividad forrajera diaria promedio por lote para un campo particular (Estancia San Juan). Las líneas finas representan lotes con pasturas de loma, y las líneas gruesas lotes con pasturas naturalizadas de bajo.	19
Figura 2.7. Distribución de frecuencia de la productividad forrajera por lote para el mes de septiembre en los últimos 9 años. (a) Pasturas de loma, (b) Pasturas naturalizadas de bajo. El número total de lotes en las distribuciones de frecuencias fue, en promedio para los nueve años, de 158 para las pasturas de loma y de 93 para las Pasturas naturalizadas de bajo. .	20
Figura 2.8. Producción de carne, suplementación con grano de maíz, y productividad forrajera anual promedio de los distintos recursos forrajeros del establecimiento San Juan para los últimos 9 ciclos de producción. Análisis generado por Fernando Pacín, asesor del CREA Lamadrid.	21

Figura 2.9. Productividad forrajera anual (promedio del establecimiento) y eficiencia de producción (definida como kg de carne producidos por tonelada de forraje producida, descontando la carne producida a expensas de suplementación) para los campos del grupo CREA Lamadrid en el ciclo de producción 2005-2006. Análisis generado por Fernando Pacín, asesor del CREA Lamadrid..... 22

Figura 3.1. Ejemplo de lotes de trigo en la campaña 2004-2005. Cada lote incluye una cantidad variable de píxeles de las imágenes satelitales MODIS. Dentro de cada píxel se puede ver su centro y una ubicación posible de las 10 estaciones de muestreo a campo que lo representan. La imagen de esta figura corresponde a una vista utilizando el programa *Google Earth*. 32

Figura 3.2. fRFAA estimada a campo para cada píxel en función del índice de vegetación cociente simple (CS) (a), y de la reflexión en la región electromagnética del rojo (b) y el infrarrojo cercano (c). Los datos de reflexión provienen de observaciones del sensor espectral MODIS para cada píxel en una fecha ubicada dentro de un período de 16 días alrededor de la fecha de muestreo a campo. Las líneas gruesas representan la función de mejor ajuste entre ambas variables. En (a) la línea delgada representa el modelo de fRFAA en función de CS utilizado en el capítulo II..... 37

Figura 3.3. fRFAA estimada a campo para cada píxel en función de (a) el índice de vegetación normalizado (IVN), y (b) el índice de vegetación mejorado (IVM). Los datos de IVN e IVM son calculados en forma estándar en la sección Procesamiento del proyecto MODIS y forman parte del producto MOD13Q1, que tiene una resolución temporal de 16 días. Las líneas gruesas representan la función de mejor ajuste entre ambas variables. En (a) la línea delgada representa el modelo utilizado en el capítulo II para estimar fRFAA a partir del IVN..... 38

Figura 3.4. fRFAA estimada a campo para cada píxel en función del índice de vegetación normalizado (IVN) (a, b), y del índice de vegetación mejorado (IVM) (c, d). Los puntos en gris provienen de cultivos con presencia de cantidades variables de hojas y tallos muertos. En a y c se presenta la fRFAA de los puntos grises tal cual tomada a campo ($fRFAA_{\text{verde+seco}}$), en b y d se presenta la fRFAA de estos puntos corregida por senescencia (i.e. $fRFAA_{\text{verde+seco}} * \% \text{material muerto}$). Las líneas gruesas representan la función de mejor ajuste entre las variables sin incluir los puntos grises..... 39

Figura 3.5. fRFAA estimada a campo para cada píxel en función de los índices de vegetación (a) SAVI_1 (*soil adjusted vegetation index*, formulado con factor de corrección 1), (b) SAVI_0.05 (formulado con factor de corrección 0.05), y (c) WDRVI (*wide dynamic range vegetation index*). Las líneas gruesas representan la función de mejor ajuste entre las variables. 40

Figura 3.6. fRFAA estimada a campo para cada píxel en función del índice de vegetación normalizado (IVN) proveniente de compuestos de 16 (a) y 8 (b) días. Las líneas gruesas representan la función de mejor ajuste entre ambas variables. 41

Figura 3.7. Relación entre las mediciones a campo del sensor hiperespectral y el sensor MODIS para el índice de vegetación normalizado (IVN, a), la reflexión en la longitud de onda del rojo (b) y del infrarrojo cercano (c). Las líneas representan la relación de mejor ajuste y la recta 1:1. Cada símbolo representa el mismo píxel particular en las tres Figuras. 41

Figura 4.1. Dinámica temporal del manejo del agua durante cada estación del año (líneas verticales, riegos hasta capacidad de campo, líneas oblicuas, sequía). Las flechas indican la aplicación de los tratamientos de defoliación, al inicio y en la mitad de la estación. 51

Figura 4.10. Eficiencia en el uso de la radiación y fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida anual de la pastura para los tratamientos de defoliación (a) y de disponibilidad de recursos (b). Los valores están expresados en forma relativa al tratamiento señalado con una flecha: riego (R) en (a) y defoliación leve (Def 15) en (b). 65

Figura 4.11. Eficiencia en el uso de la radiación para intervalos de aproximadamente 12 días durante el período de rebrote en función de la RFA incidente. Símbolos negros: tratamientos

con sombreo; símbolos grises: tratamientos sin sombreo; triángulos: invierno; rombos: primavera; círculos: verano; cuadrados: otoño. Los dos símbolos para cada situación son promedios de los tratamientos de defoliación severa y leve. 66

Figura 4.12. Productividad forrajera en función de la radiación fotosintéticamente activa absorbida para los tratamientos de disponibilidad de recursos y de defoliación a distintas escalas temporales: (a) estación (90 días), (b) período de rebrote (45 días), y (c) intervalo decádico (revisita al experimento, 12 días). La relación funcional entre productividad forrajera y radiación fotosintéticamente activa absorbida representa la eficiencia en el uso de la radiación, y la variabilidad de los datos en torno a esa relación (R^2) representa la variabilidad de la eficiencia en el uso de la radiación. 67

Figura 4.13. Cambios del contenido de agua útil en el suelo hasta 80 cm de profundidad a lo largo de los 8 períodos de rebrote del experimento para los tres tratamientos de manejo del agua: riego permanente (R), sequía temporal (ST), y sequía permanente (SP). Se muestran solo los tratamientos de defoliación severa (remanente a 7cm) para mayor claridad de la figura, los contrastes son muy similares para los tratamientos de defoliación leve (remanente a 15cm). 68

Figura 4.14. Cociente entre la evapotranspiración y la evapotranspiración potencial de la pastura a lo largo del año para los tres tratamientos de manejo del agua: riego permanente (R), sequía temporal (ST), y sequía permanente (SP). Se muestran solo los tratamientos de defoliación severa (remanente a 7cm) para mayor claridad de la figura, los contrastes son muy similares para los tratamientos de defoliación leve (remanente a 15cm). 69

Figura 4.15. Modelo de regresión ajustado entre la productividad forrajera y la radiación fotosintéticamente activa absorbida para las tres escalas temporales analizadas. 74

Figura 4.2. Esquema de una parcela. Las líneas llenas verticales corresponden a los surcos de siembra. Los rectángulos muestran la ubicación de los marcos de 64X40 cm en las sucesivas cosechas a lo largo de una estación. Nótese los surcos dejados como bordura. Cada marco incluía dos surcos de festuca y dos de alfalfa, en un área total de 0.256 m², que se cosechaban a ras del suelo. 53

Figura 4.3. $fRFAA_{\text{verde+seco}}$ (círculos grises) y $fRFAA$ corregida (cuadrados negros) en función del índice de vegetación normalizado calculado a partir de mediciones de reflectancia a campo con un sensor de mano Skye (rojo = 630 nm, infrarojo cercano = 700 nm). La línea negra muestra la relación $fRFAA$ -IVN generada en el Capítulo 3 para cultivos de trigo sin material muerto. 55

Figura 4.4. Contenido de agua útil hasta 20cm de profundidad a lo largo del experimento. La línea negra representa la salida del modelo de balance hídrico, la línea gris los datos medidos con los sensores. Se presentan los tratamientos riego (panel superior) y sequía permanente (panel inferior) en promedio para los dos niveles de defoliación. Las barras representan un desvío estándar para los períodos con datos para más de una parcela. 57

Figura 4.5. Cambios en la materia seca verde total y la $RFAA$ a lo largo de los 8 períodos de rebrote del experimento para los tratamientos de fertilización y riego y sequía permanente. Se muestran estos tratamientos para clarificar la estructura temporal del experimento. La materia seca verde total es la suma de festuca y alfalfa. La pendiente de la curva de la materia seca verde representa la productividad forrajera. 59

Figura 4.6. Productividad forrajera de festuca (columna izquierda), alfalfa (columna central), y total (columna derecha) para los tratamientos de disponibilidad de recursos y de defoliación, en las cuatro estaciones del año (cuatro paneles horizontales). En ningún caso la interacción entre los tratamientos de disponibilidad de recursos y de defoliación fue significativa. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$). 61

Figura 4.7. Composición de la materia seca verde total a lo largo del año, expresada como porcentaje de festuca sobre el total de la pastura (festuca / (festuca+ alfalfa)), para los tratamientos de defoliación (a) y de disponibilidad de recursos (b)..... 61

Figura 4.8. Eficiencia en el uso de la radiación de la pastura a lo largo del año para los tratamientos de defoliación (a) y de disponibilidad de recursos (b)..... 63

Figura 4.9. Fracción de radiación fotosintéticamente absorbida de la pastura a lo largo del año para los tratamientos de defoliación (a) y de disponibilidad de recursos (b)..... 64

Figura 5.1. Representación esquemática de posibles funciones de control de la EUR óptima. S, coeficiente que toma valores entre 0 y 1 de acuerdo al nivel de limitación impuesto por el factor en cuestión y reduce proporcionalmente el valor de la EUR. Futuros trabajos deberían trabajar en la parametrización detallada de estas y otras funciones de control de la EUR. (a) S_{agua} , es el coeficiente de estrés hídrico, que se calcula como el cociente entre la Et real del cultivo y la Etp para el día en cuestión. El valor del coeficiente depende del contenido de agua útil en el suelo (CAU), en la medida que el suelo se seca y se acerca al punto de marchitez permanente (PMP), la Et se reduce respecto de la Etp y el coeficiente es cada vez menor. El valor umbral indicado en 75% es aproximado depende del tipo de suelo. (b) S_{temp} es el coeficiente de temperatura mínima. Temperaturas mínimas diarias menores a 10°C comienzan a ser limitantes para la fotosíntesis en muchas especies de climas templados. Eventualmente, en días muy fríos el coeficiente toma valor cero, truncando la PF del día. (c) S_{rad} es el coeficiente de radiación difusa. En días con mayor nivel de radiación difusa, es decir menor porcentaje de RFA respecto de la condición de día despejado, el coeficiente toma valores mayores. A su vez para canopeos con menor IAF el coeficiente toma valores mayores. (d) $S_{\text{nitrógeno}}$ es el coeficiente de condición nitrogenada. Debajo de un valor umbral de 2.7-3% de N foliar, el coeficiente comienza a reducirse..... 78

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.

SIGLAS Y ABREVIATURAS

AACREA	Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agropecuaria
ANVA	Análisis de varianza
CS	Cociente simple
DMS	Diferencia mínima significativa
ET	Evapotranspiración real
ETP	Evapotranspiración potencial
EUA	Eficiencia en el uso del agua
EUR	Eficiencia en el uso de la radiación
fRFAA	Fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida
GPS	Geo-posicionamiento satelital
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
IV	Índice de vegetación
IVM	Índice de vegetación Mejorado
IVN	Índice de vegetación normalizado
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MS	Materia seca
MSV	Materia seca verde
PF	Productividad forrajera
RFA	Radiación fotosintéticamente activa
RFAA	Radiación fotosintéticamente activa absorbida
SAVI	En inglés, índice de vegetación ajustado por suelo
WDRVI	En inglés, índice de rango dinámico ampliado

Seguimiento de la productividad forrajera mediante teledetección: desarrollo de una herramienta de manejo para sistemas de producción ganaderos

RESUMEN

La Productividad Forrajera (PF) es una variable crítica para el manejo y la planificación de los sistemas de producción ganaderos. Sin embargo, las dificultades para cuantificarla a campo y la necesidad de manejar un marco conceptual robusto para utilizarla en la toma de decisiones hacen que habitualmente los sistemas de producción se manejen con una caracterización rudimentaria de esta variable. En esta tesis se desarrolló un sistema de seguimiento de la PF en tiempo real y a la escala de lote, basado en la lógica de la eficiencia en el uso de la radiación (EUR). Primero se diseñó y se puso en funcionamiento una versión preliminar del sistema, y luego se investigaron en mayor detalle dos aspectos críticos de su funcionamiento: la estimación de la fracción de radiación absorbida por el canopeo (fRFAA) a partir de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales, y el comportamiento de la EUR ante variaciones del estrés ambiental, el manejo de la defoliación, y la escala temporal de observación. La metodología para implementar la versión preliminar del sistema de seguimiento forrajero se basó en estimar la fRFAA y la EUR. La primera fue estimada como una función no lineal del índice de vegetación normalizado del sensor MODIS. La estimación de la EUR se basó en calibraciones empíricas entre la PF estimada a campo y la radiación absorbida para dos recursos forrajeros: pasturas de loma y bajos de agropiro. Los resultados mostraron que la radiación absorbida predijo datos independientes de PF con precisión aceptable. El sistema fue implementado informáticamente en un software específico denominado *Segf*. En relación al primer aspecto de mejora del sistema, la estimación de la fRFAA, se estudió la absorción de radiación a campo con una barra de interceptación en cultivos de trigo (utilizados como modelo experimental) y se la correlacionó con distintos índices de vegetación calculados a partir del sensor espectral MODIS. Se encontró que los índices de vegetación explicaron entre 90 y 94% de las variaciones de fRFAA. El índice de vegetación mejorado presentó una relación más lineal que el clásico índice de vegetación normalizado, posiblemente debido a la ausencia de saturación del primero ante aumentos del área foliar. En relación al segundo aspecto de mejora del sistema, la variabilidad de la EUR, se realizó un experimento de un año sobre una pastura consociada de festuca y alfalfa sometida a distintos tratamientos. La EUR fue más estable que la fRFAA ante cambios de la disponibilidad de recursos y de intensidad de defoliación. Sin embargo, la EUR tendió a disminuir ante estrés hídrico (déficit y exceso), y a aumentar ante defoliación severa y sombreado. Además, la variabilidad de la EUR a lo largo del rebrote de la pastura y entre tratamientos dependió de la escala temporal de observación o cálculo: fue más variable al considerar períodos de 12 días que al considerar todo el período de rebrote o la estación (45 y 90 días respectivamente). Como resultado de la tesis, los productores agropecuarios y sus asesores cuentan con un sistema capaz de estimar mes a mes la PF de sus lotes para una serie temporal de aproximadamente diez años. Actualmente 1.478.000ha ganaderas están bajo seguimiento mediante un sistema basado en esta tesis. Esto implica un cambio cualitativo de disponibilidad de información y representa una oportunidad para tomar mejores decisiones de manejo, a la vez que concientiza sobre el uso racional del forraje para maximizar su crecimiento. Adicionalmente, la base de datos de PF generada, extraordinariamente amplía en su cobertura espacial y temporal, será de utilidad para trabajos de investigación sobre los patrones espacio-temporales de PF.

Monitoring forage production: a managerial tool for livestock production systems

ABSTRACT

Forage production (FP) is a critical variable for the management and planning of livestock production systems. However, the difficulties for estimating FP in the field and the need for a robust conceptual framework to utilize that information have lead most farmers to manage their production systems with a rudimental characterization of this variable. This thesis developed a system to monitor FP in real time at the paddock level, based on the radiation use efficiency (RUE) logic. First, we designed and set in operation a preliminary version of the system, and then we investigated in greater detail two critical aspects of its functioning: the estimation of the fraction of photosynthetically active radiation absorbed by the canopy (fPAR) from vegetation indices, and the effects of environmental stresses, defoliation management, and temporal scale on the RUE. For the preliminary version of the system, the methodology was based on the estimation of fPAR and RUE. The former was estimated as a non-linear function of the normalized difference vegetation index (NDVI) from the MODIS sensor, whereas the latter was empirically estimated from field measurements of FP and absorbed PAR for the two main forage resources of the region: upland sown pastures and lowland naturalized pastures. The results showed that these empirical calibrations were able to predict independent FP data with reasonable precision. The system was computationally implemented with routines operating over a relational database. Regarding the first aspect for improvement of the system, fPAR estimation, we studied the absorption of radiation by wheat canopies (used as experimental model) and correlated it with different vegetation indices from the MODIS sensor. We found that the vegetation indices explained between 90 and 94% of the variations of fPAR. The most recent enhanced vegetation index showed a more linear relation with fPAR than the classical NDVI, probably in response to a lower saturation of the former under high levels of leaf area. Regarding the second aspect for system improvement, RUE variability, we conducted a one-year field experiment in a mixed pasture subjected to different treatments. The results showed that RUE was less responsive than fPAR to changes in resource availability and defoliation intensity. However, RUE tended to decrease under water stress (both deficit and excess) and to increase under severe defoliation and increments in the proportion of diffuse radiation. Additionally, RUE variability during regrowth and among treatments depended on the temporal scale of observation: RUE was more variable for 12-day periods than 45- or 90-day periods. Now, farmers and their advisors have a system capable of estimating every month the FP of their paddocks for a temporal series of ten years. At the moment, 1.478.000ha are being monitored with a system based on this thesis. This new monitoring system implies a qualitative change in the availability of information and brings an opportunity for better managerial decision making. The FP database generated, extraordinarily broad in spatial and temporal scale, will be of great utility for new research on spatial and temporal patterns of FP.

**Seguimiento de la productividad forrajera mediante
teledetección: desarrollo de una herramienta de manejo para
sistemas de producción ganaderos**

CAPÍTULO 1. Introducción General

1.1 Los sistemas de producción ganaderos

Los pastizales naturales y pasturas cultivadas representan el uso de la tierra más extendido a nivel global. En ellos se sustenta la producción pecuaria mundial que representa aproximadamente el 40% del valor bruto de la producción agropecuaria (Phillips 2001, Almeyra et al. 2003). En la Argentina, el 61% de la superficie está ocupada por pastizales, arbustales, y pasturas, que sustentan la producción pecuaria que es un 42% del producto bruto agropecuario nacional (Almeyra et al. 2003). Si bien una parte de los sistemas de producción ganaderos de nuestro país han sido fuertemente intensificados en los últimos quince años aumentando la suplementación estratégica con grano y/o silo de maíz, el forraje proveniente del pastoreo continúa siendo el principal componente de la dieta (Rearte 2007). En general, los animales consumen forraje de los pastizales y de pasturas anuales y perennes durante todo el año y reciben suplementación solo ocasionalmente cuando se requiere una mayor concentración energética en la dieta o cuando existen déficits en la productividad de las pasturas. Avena, centeno, trigo y cebada son las principales forrajeras anuales utilizadas durante el invierno y sorgo o maíz durante el verano. Las principales especies de las pasturas son *Festuca arundinacea*, *Dactylis glomerata*, *Phalaris aquatica*, *Lolium perenne*, *Bromus sp.*, *Agropyron elongatum*, entre las gramíneas, y *Trifolium pratense*, *T. repens*, *Medicago sativa*, *Melilotus officinalis*, entre las leguminosas (Rearte 2007).

La productividad forrajera (PF, Kg/ha/día, utilizada en esta tesis como sinónimo de productividad primaria neta aérea) de pastizales y pasturas es un aspecto crítico y altamente variable de los sistemas pastoriles. Representa la cantidad de energía o biomasa fijada por los organismos autótrofos por sobre sus requerimientos respiratorios y asignada a la parte aérea (Fig. 1.1, Sala et al. 1981, McNaughton et al. 1996, Sala y Austin 2000, Lauenroth et al. 2006). Esa cantidad de biomasa generada puede ser consumida por herbívoros, quemada, o eventualmente senesce, cae, y se descompone e incorpora a la materia orgánica del suelo (Oesterheld et al. 1999). Conocer la PF es un requisito central para manejar racionalmente los sistemas de producción ganaderos, especialmente los más intensificados, porque es la principal determinante de la carga animal en sistemas sin suplementación, o de las necesidades de suplementación en los sistemas que la utilizan (Vallentine 2001).

La PF es extremadamente variable, tanto espacial como temporalmente. Espacialmente, a escala regional, la precipitación media anual es el determinante principal de las variaciones de PF (Sala et al. 1988, Jobbagy et al. 2002). A escala de paisaje la heterogeneidad está más asociada a las propiedades físicas y químicas de los suelos, a las características de las especies dominantes en el pastizal o pastura, y a variables de manejo como el pastoreo y la fertilización (Epstein et al. 1997, Agnusdei et al. 2001). Temporalmente, a lo largo del año, la disponibilidad hídrica, la temperatura y la radiación incidente determinan cambios muy pronunciados en la PF de un mismo sitio (Jobbagy et al. 2002, Piñeiro et al. 2006). Por ejemplo, en pasturas de la Pampa Deprimida Bonaerense es común que la PF en algunas semanas de primavera sea diez veces mayor que la PF durante el invierno (Agnusdei et al. 2001). Por último, la PF anual varía marcadamente en respuesta a la precipitación media anual (Lauenroth y Sala 1992). Estos patrones de variación de la PF hacen, a la vez, más necesaria y más difícil su estimación.

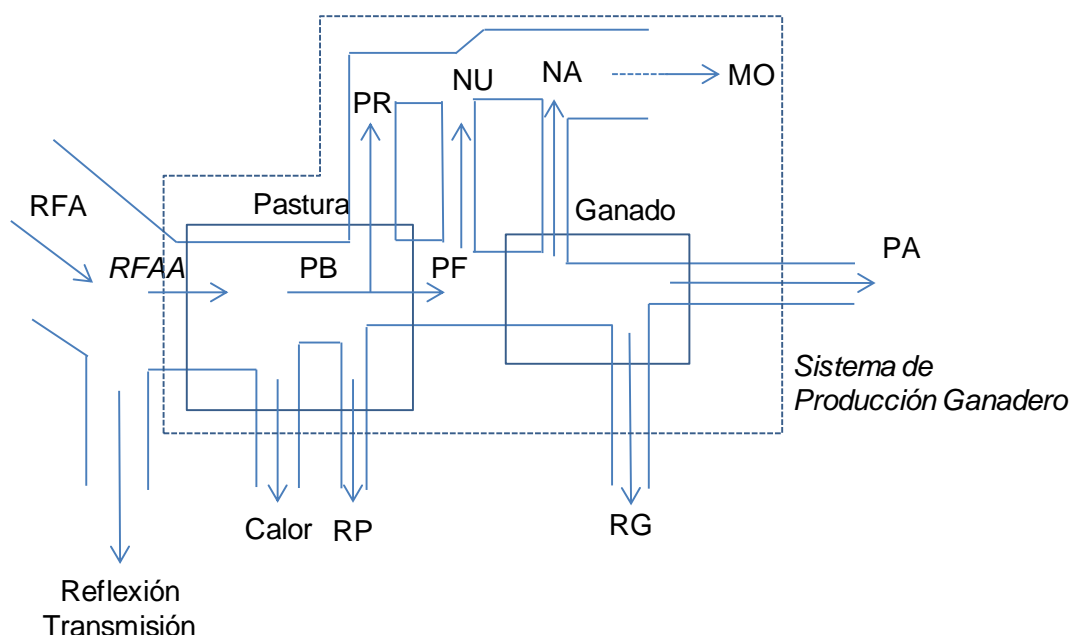


Figura 1.1. Flujo de energía simplificado de un sistema de producción ganadero con base pastoril. RFA, radiación fotosintéticamente activa incidente; RFAA, radiación fotosintéticamente activa absorbida por la pastura (puede ser estimada mediante teledetección); PB, productividad primaria bruta; RP, respiración de la pastura; PR, productividad subterránea; PF, productividad forrajera (también productividad primaria neta aérea); NU, forraje no utilizado; NA, material no asimilado y excretado por el ganado; RG, respiración del ganado; MO, materia orgánica del suelo (antes de aportar a la MO la PR, NU y NA entran en compartimentos de otros animales y microorganismos no detallados en este diagrama); PA, productividad animal exportada del sistema de producción ganadero. El recuadro punteado indica los límites del sistema de producción ganadero. El modelo de Monteith o de la EUR (eficiencia en el uso de la radiación) se extiende a la izquierda de la figura, desde RFA hasta PF. Los subsidios de energía incorporados con el manejo (combustible, fertilizantes, pesticidas, etc) permiten, en general, reducir la magnitud de los flujos de pérdidas, como la respiración y la energía no asimilada. La suplementación con grano o concentrados incrementa el flujo de de PF que ingresa al compartimento del ganado. En la figura los tamaños de los flujos no guardan una proporcionalidad con la realidad.

El balance forrajero es la herramienta básica de análisis que permite incluir la información de PF en el esquema de manejo de un sistema de producción (Donnelly et al. 2002). Esta comparación sistemática de la oferta y la demanda de alimentos permite a los asesores y productores diagnosticar las eficiencias productivas de ciclos pasados y tomar medidas correctivas en las instancias de planificación (Stuth et al. 1993). Así, la construcción de escenarios posibles de oferta de forraje para el ciclo de producción que se inicia, en función del conocimiento que se tenga de las variaciones de la PF, permite definir los niveles de riesgo que se enfrentan con la carga animal actual (Donnelly et al. 2002). En muchos sistemas el riesgo de desbalances negativos es suplido con suplementación, lo cual permite expresar el riesgo en términos económicos. Para llevar este tipo de análisis es entonces necesario estimar los requerimientos energéticos de los animales y conocer la variación temporal de la productividad forrajera de los recursos del establecimiento.

A pesar del consenso que existe, tanto en ámbitos académicos como de la producción, sobre la necesidad de conocer la PF, gran parte de los sistemas productivos del mundo y de la Argentina son manejados con una cuantificación rudimentaria de esta variable. Las causas principales de esta situación parecen ser las dificultades asociadas a los métodos tradicionales de estimación de la PF y la resistencia natural entre quienes manejan los sistemas de producción a modificar el marco conceptual sobre el que se basa la toma de decisiones (Biondini et al. 1991, McNaughton et al. 1996, Sala y Austin 2000, Oesterheld et al. 2005). Esta deficiencia

constituye, sin embargo, una oportunidad de mejora ya que una transformación en este aspecto de la idiosincrasia productiva tendría potencialmente un impacto positivo significativo sobre la producción animal de los sistemas de producción.

1.2 Estimación y seguimiento de la PF

¿Cuáles han sido, entonces, las metodologías utilizadas para conocer la PF? Entre las aproximaciones más frecuentes se encuentran las cosechas de biomasa repetidas en el tiempo, los métodos indirectos calibrados con estimaciones a partir de cosechas de biomasa, y los modelos de simulación. Tradicionalmente en trabajos de investigación la PF se ha estimado a campo a partir de cosechas de biomasa desfasadas en el tiempo (Sala et al. 1981, Ni 2004, Hirata et al. 2005). En su versión de cálculo más sencilla, la diferencia entre la biomasa al final (tiempo 1) y al inicio (tiempo 0) del período en cuestión representa la productividad (Biondini et al. 1991, Sala y Austin 2000). La estimación de la PF a partir de cortes de biomasa presenta limitaciones para ser extensivamente implementada a la escala de unidad de manejo, fundamentalmente porque la variabilidad espacial y estacional de los recursos forrajeros requiere alta intensidad de muestreo y repetición indefinida en el tiempo. En esas condiciones las estimaciones por cortes resultan en la práctica muy difíciles de implementar rutinariamente, del modo que se las necesita para manejar y planificar el pastoreo. En el ámbito de la producción, se utilizan también métodos indirectos como el visual, o el disco o plato que mide la altura y resistencia del canopeo, cuyas lecturas son calibradas con estimaciones a partir de cortes de biomasa consideradas como patrón (Irving et al. 1995, Teague et al. 1996, Sanderson et al. 2001). Estos métodos son menos laboriosos que los cortes de biomasa pero aún así necesitan de un operario muestreando intensamente los lotes para alcanzar representatividad, por lo que no suelen ser mantenidos en el tiempo en los sistemas de producción que los implementan, a excepción de algunos sistemas muy intensificados, típicamente tambos (F Pacín, JM Grigera, com pers.). Otra alternativa para estimar la PF son los modelos de simulación de pasturas, que han demostrado amplia utilidad en el ámbito científico (Johnson y Thornley 1983, 1985, McCall y Bishop-Hurley 2003, Peri et al. 2003, Corson et al. 2006). Sin embargo, requieren información detallada de parámetros o variables intermedias, como el índice de área foliar o características edáficas, que, al igual que las cosechas de biomasa, son muy difíciles de obtener de un modo representativo a la escala de lote en condiciones de producción (Moore et al. 1997, Donnelly et al. 2002, Diaz-Solis et al. 2003, Zhang et al. 2006). Es decir que la complejidad operativa de los métodos de estimación de la PF lleva a que la gran mayoría de los sistemas de producción ganaderos se manejen en general sin una cuantificación de esa variable (Cherney y Allen 1995, Donnelly et al. 2002).

El marco de referencia de la eficiencia en el uso de la radiación (EUR), basado en el modelo ecofisiológico propuesto por Monteith (1972), es otra alternativa para estimar la PF (Hill et al. 2004, Piñeiro et al. 2006, Reeves et al. 2006). Esta aproximación propone que la productividad en un período de tiempo (un mes, por ejemplo) está determinada por la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA) por el canopeo en ese período, y la eficiencia con que esa energía es transformada en biomasa aérea (EUR):

$$PF_{(kg/ha/me)} = RFAA_{(MJ/ha/me)} * EUR_{(kgMS/MJ)},$$

La RFAA es a su vez el producto entre la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA) y la fracción de esta que es absorbida por el canopeo (fRFAA). La fRFAA depende de la cantidad de área foliar y de la estructura del canopeo. El modelo de la EUR ha sido ampliamente utilizado para estimar la productividad primaria bruta y neta

a distintas escalas, desde parcelas de cultivo (Sinclair y Muchow 1999) hasta escala global (Running et al. 2000, Running et al. 2004), debido en parte a la posibilidad de estimar la fRFAA a partir de índices de vegetación sencillos derivados de imágenes satelitales (Glenn et al. 2008). El Índice de Vegetación Normalizado (IVN) es el más común entre los Índices de Vegetación (IV) que se calculan a partir de observaciones satelitales para el seguimiento de la vegetación. El IVN está directamente relacionado con la fRFAA por los componentes verdes del canopy (Sellers 1985, Huete et al. 2002, Glenn et al. 2008). El marco de referencia de la EUR, a la vez sencillo y con base mecanística, permite combinar información de teledetección y ecofisiología de pasturas con el objetivo de generar un sistema operativo de estimación de PF para sistemas de producción ganaderos.

En los últimos años las mejoras tecnológicas en instrumentos de teledetección aumentaron la disponibilidad de información de elevada calidad sobre el estado de la vegetación (Justice et al. 2002, van Leeuwen et al. 2006, Miura et al. 2008). Los modelos conceptuales ecofisiológicos son el puente para transformar esos avances tecnológicos en herramientas de manejo de los recursos naturales. Actualmente existen satélites con sensores espectrales que generan información a escalas temporales y espaciales adecuadas para realizar un seguimiento de la vegetación a escala de unidad de manejo. También las plataformas de procesamiento y accesibilidad de las imágenes satelitales han mostrado avances sustanciales, fundamentalmente basados en la generación de productos con correcciones y georreferenciación, y en su distribución a partir de portales web interactivos (ver por ejemplo: <http://lpdaac.usgs.gov/main.asp>, <http://glovis.usgs.gov>). Sin embargo, no existen actualmente sistemas que utilicen esta información como base para asistir la toma de decisiones en sistemas de producción. En particular para los sistemas de producción ganaderos, es necesario generar una plataforma conceptual y operativa que genere información cuantitativa de variables agronómicas relevantes para el manejo, como la PF, y a escalas espacio-temporales adecuadas para tomar decisiones de manejo.

Un sistema de estimación de la PF de esta naturaleza podría plantearse sobre el marco de referencia de la EUR y ponerse en funcionamiento con relativa facilidad. Sin embargo, su robustez y precisión dependerán en gran medida de dos aspectos críticos: la estimación de la fRFAA a partir de variables espectrales como los IV (Huete et al. 2002, Myneni et al. 2002), y el comportamiento de la EUR ante situaciones de estrés ambiental (Running et al. 2004, Xiao et al. 2004, Reeves et al. 2006) a distintas escalas temporales (Field et al. 1995, Medlyn et al. 2003). Estos aspectos, que constituyen el centro de esta tesis, serán tratados con cierto detalle a continuación.

1.3 Estimación de la fRFAA de pasturas y cultivos a partir de variables espectrales

Existen distintas formas de estimar a campo la fRFAA por los tejidos verdes del canopy: se puede calcular a partir del área foliar, medir a campo con barras de interceptación, y estimar con índices espectrales. En general, el interés por conocer la fRFAA está asociado al desarrollo o evaluación de modelos de simulación de cultivos y de modelos que utilizan teledetección, en los que la fRFAA es una variable intermedia clave para caracterizar el funcionamiento de la vegetación (Sinclair y Horie 1989, Jonckheere et al. 2004, Nagler et al. 2004, Weiss et al. 2007, Glenn et al. 2008). En este contexto, en trabajos experimentales la fRFAA suele ser estimada a partir del índice de área foliar y el coeficiente de extinción, o bien medida con barras de interceptación. El esfuerzo de muestreo involucrado en cualquiera de estos casos suele ser elevado y depende de la heterogeneidad del canopy que se desee

caracterizar. Además, cuando se utilizan barras de interceptación, la presencia de material muerto en pie puede dificultar las determinaciones (Di Bella et al. 2004) porque se busca conocer solo la interceptación por parte de los tejidos verdes del canopy, que son los que presentan capacidad fotosintética.

Una aproximación alternativa para estimar la fRFAA es mediante sensores remotos. Estos se basan en la relación funcional existente entre las propiedades espectrales del canopy, es decir la forma en que el canopy refleja y absorbe la radiación en distintas longitudes de onda, y la fRFAA (Tucker 1979, Sellers 1985, Huete 1988, Gitelson 2004). Así, los sensores remotos a bordo de satélites permiten estimar el comportamiento espectral de la superficie y proveen información que es utilizada como base de algoritmos diseñados para estimar distintas propiedades de la vegetación (Myneni et al. 2002). Los índices de vegetación (IV) son un grupo de algoritmos que están directamente relacionados con la fRFAA porque se basan en las propiedades espectrales de la vegetación verde de absorber intensamente la radiación visible para el proceso fotosintético (especialmente en la longitud de onda del rojo, *red*), y de reflejar la mayor parte de la radiación en la zona del infrarrojo cercano (*nir*, Sellers 1985, Huete et al. 2002). El índice de vegetación normalizado (IVN, (*nir-red*) dividido por la suma de ambos, Tucker 1979) es el índice más ampliamente utilizado. El índice de vegetación mejorado (IVM, Huete et al. 2002, Jiang et al. 2008) incorpora en su cálculo, además del rojo y el infrarrojo cercano, información espectral en la banda del azul, con el objetivo de corregir la saturación del índice a altos niveles de área foliar y la distorsión generada por el color del suelo y la presencia de aerosoles. El comportamiento espectral de la vegetación verde está, en parte, asociado a la clorofila, y por ello permite inferir la proporción de la radiación incidente canalizada a la fotosíntesis (Sellers 1985, Di Bella et al. 2004, Gitelson et al. 2007). Así, la teledetección abre la posibilidad de estimar esta variable biofísica para grandes superficies y de forma continua en el tiempo, lo cual sería inviable con otras metodologías.

En general los principales problemas para estimar la fRFAA a partir de teledetección han sido cuestiones tecnológicas asociadas a la resolución espacial, temporal y espectral de los sensores remotos utilizados (Ruimy y Saugier 1994, Field et al. 1995, Paruelo et al. 2000b, Hill et al. 2004). La resolución espacial es el tamaño mínimo de píxel de las imágenes, lo cual determina la superficie mínima que puede ser caracterizada de forma individual. Por ejemplo, las imágenes NOAA Pathfinder (AVHRR) tienen una resolución espacial de 8km, es decir, píxeles de 6400 ha. La resolución temporal se refiere a la frecuencia de revisita del sensor a un mismo sitio de la tierra, o desde un punto de vista utilitario, al mínimo intervalo de días entre imágenes luego de que han sido procesadas para eliminar los datos de baja calidad. Por ejemplo, uno de los productos más utilizados del proyecto MODIS es *MOD13*, que se trata de compuestos de imágenes de IVN con resolución temporal de 16 días. La resolución espectral se refiere al ancho de banda, es decir a la cantidad de nanómetros a los que el sensor es sensible para una banda en particular del espectro electromagnético. Por ejemplo, la resolución espectral del sensor MODIS en la banda del rojo es de 50 nm (620-670). En general existe una relación de compromiso entre la resolución espacial y temporal de los sensores, y es en parte debido a ello que no existe un satélite ideal para todas las aplicaciones, sino que la selección de las imágenes más adecuadas para un proyecto particular depende de los objetivos buscados (Justice et al. 2002).

Como se dijo más arriba, la precisión en la estimación de la fRFAA a partir de IV es crítica para estimar la PF en el marco del modelo de Monteith. La diversidad existente de IV y sensores remotos, y la influencia de la atmósfera, el color del suelo, y el tipo de vegetación, determinan que la relación entre los IV y la fRFAA deba ser

parametrizada y validada para las condiciones particulares en las que se la utilizará (Gallo et al. 1985, Sellers 1985, Potter et al. 1993, Le Roux et al. 1997, Los et al. 2000, Piñeiro et al. 2006). Entre las formas de relación posibles, las funciones lineales, que utilizan menos parámetros que las curvilíneas, son preferibles por su simplicidad, precisión y menor nivel de saturación (Huete et al. 2002, Glenn et al. 2008).

1.4 Ecofisiología de la EUR antes situaciones de estrés

El segundo aspecto a prestar atención para estimar la PF en el marco del modelo de Monteith es el comportamiento de la EUR ante situaciones de estrés ambiental y variaciones en la escala temporal de observación. Como se dijo más arriba, la EUR (g/MJ) representa la eficiencia de conversión de energía en biomasa, una medida de la cantidad de biomasa generada por unidad de energía solar absorbida (Monteith 1972). El modelo de la EUR ha adquirido amplia difusión en la ecofisiología vegetal y la agronomía como aproximación cuantitativa para estimar la productividad a escala de canopeo, en parte debido a que es a la vez sencillo y conceptualmente robusto (Sinclair y Muchow 1999, Running et al. 2004). Así, numerosos modelos utilizan un valor de EUR previamente caracterizado para un cultivo o tipo de vegetación determinado – aún ante un rango de condiciones ambientales más o menos variables- para derivar la tasa de acumulación de biomasa en función de la RFAA (Ruimy y Saugier 1994, Running et al. 2000, Hill et al. 2004).

Dependiendo del punto de vista del observador, la EUR ha sido subjetivamente descrita como un valor muy estable o muy variable (Daughtry et al. 1992, Dewar et al. 1998, Medlyn 1998, Sinclair y Muchow 1999, Choudhury 2000, Bradford et al. 2005). Puede argumentarse una relativa estabilidad considerando por ejemplo que habitualmente en una pastura la marcha anual de la EUR muestra una variación relativa menor que la PF y la RFAA, que suelen mostrar incrementos de hasta diez veces su valor entre el mínimo y el máximo. Pero por otra parte, se puede argumentar un comportamiento variable de la EUR considerando que su valor suele reducirse a la mitad ante situaciones de estrés severo. Estrictamente, caracterizar la EUR para una serie de condiciones mediante un valor “promedio” es una simplificación –muchas veces razonable y sumamente útil- de una realidad más compleja. Para una comunidad (una pastura o cultivo, por ejemplo) compuesta por un grupo de especies determinado, la EUR tiene un máximo comparable con el rendimiento fotosintético medido a nivel de hoja en condiciones ambientales óptimas (Turner et al. 2003), que depende de las eficiencias de las especies intervinientes y de sus abundancias relativas en la comunidad. Sin embargo, las bajas temperaturas y las restricciones hídricas y nutricionales, entre otros factores, impiden que en el campo se alcance y sostenga ese valor (Sinclair y Muchow 1999).

Considerando el flujo de energía de un sistema de producción ganadero (Fig. 1.1), solo una proporción muy pequeña de la energía absorbida por la vegetación termina como PF (Chapin III et al. 2002). La mayor parte de la energía es disipada como calor que se canaliza hacia la transpiración o hacia un aumento de la temperatura del canopeo, y otra parte es pérdida por respiración. Además, una parte de la productividad es destinada a los órganos subterráneos de las plantas. Las condiciones ambientales pueden modificar la proporción en que la energía absorbida es canalizada a uno u otro destino. Por ejemplo, un aumento de la temperatura puede aumentar la proporción del flujo de energía involucrado en la respiración. O una condición hídrica desfavorable puede disminuir el intercambio de carbono por cierre estomático, disminuyendo el flujo hacia fotosíntesis bruta. El conocimiento de los efectos de variables ambientales y de manejo sobre el funcionamiento del flujo de energía en los sistemas productivos es fundamental para alcanzar un manejo racional.

En particular, para estimar la PF en el marco del modelo de la EUR es necesario reconocer que estas modificaciones en el flujo de energía serán causantes de variabilidad en el comportamiento de la EUR.

Si bien, como se dijo, la EUR ha sido ampliamente utilizada en la ecofisiología vegetal en los últimos treinta años, han existido también fuertes críticas al concepto. Demetriades-Shah (1992, 1994) generaron una discusión sugiriendo que las relaciones habitualmente presentadas entre la radiación interceptada acumulada y la biomasa acumulada implicaban una manipulación de los datos que derivaba necesariamente en elevados ajustes fruto de un artefacto metodológico. Luego otros autores defendieron el concepto y la metodología argumentando a favor de la validez de la relación entre la radiación y la fotosíntesis, y en la necesidad de utilizar valores acumulados para manejar los altos niveles de variabilidad provenientes de muestreos a campo (Arkebauer et al. 1994, Kiniry 1994, Monteith 1994). El concepto de la EUR siguió siendo intensamente utilizado luego de estas discusiones, pero en ciertos casos con más precauciones respecto de las conclusiones extraídas de relaciones donde las variables se presentan en forma acumulada. Por ejemplo, desde entonces, en muchos trabajos que utilizan la radiación y biomasa acumuladas no se presenta el coeficiente de determinación simple (R^2), valor que definitivamente resulta aumentado cuando se utiliza esa metodología (A Hall, com pers.).

Más allá de estas críticas, el modelo de la EUR es ampliamente utilizado para estimar la productividad primaria a distintas escalas y en distintos tipos de vegetación (Sinclair y Muchow 1999, Running et al. 2000, Running et al. 2004), y es una aproximación útil para estimar la PF de sistemas de producción ganaderos. Sin embargo, se necesita conocer mejor el efecto de la escasez de recursos (como agua, nutrientes y radiación) y del manejo de la defoliación sobre la EUR para poder aumentar la precisión de las estimaciones de PF en el marco del modelo de Monteith. La variabilidad de la EUR en relación a la escala temporal a la que se realizan las estimaciones de PF es también un aspecto central -y aún no suficientemente estudiado- para una completa caracterización de la EUR (Field et al. 1995, Ruimy et al. 1995, Joel et al. 1997, Medlyn et al. 2003).

1.5 Objetivos e hipótesis

El objetivo general de la tesis es desarrollar un sistema de seguimiento de la PF en tiempo real y a la escala de lote, y facilitar su adopción para que sea utilizado como herramienta de manejo en sistemas de producción ganaderos. Los objetivos específicos serán, primero, desarrollar y poner en funcionamiento una primer versión del sistema, luego, investigar en mayor detalle dos aspectos críticos de sus bases de funcionamiento: la relación entre índices de vegetación y la fRFAA y el comportamiento de la EUR ante situaciones de estrés ambiental y variaciones en el manejo de la defoliación y la escala temporal de observación. Las oportunidades de mejora del sistema que surjan de estas investigaciones quedarán planteadas para ser implementadas en futuras versiones del sistema de seguimiento.

El objetivo general del Capítulo 2 es diseñar, implementar y evaluar el uso de un sistema preliminar de estimación de la PF. Los objetivos específicos son:

- *Diseñar un sistema preliminar de estimación de la PF basado en la bibliografía existente y en calibraciones empíricas para estimar la EUR.* La hipótesis asociada a este objetivo establece que las variaciones de la EUR de un recurso forrajero particular (grupo de especies en un tipo de suelo determinado) a lo largo del tiempo (i.e. debidas al clima) son menores que las variaciones de la EUR entre recursos forrajeros

distintos. Una predicción que se desprende de esta hipótesis es que al relacionar las variaciones temporales de la PF en función de la RFAA se obtendrán modelos de regresión significativamente distintos para los distintos recursos forrajeros.

- *Distribuir y evaluar el uso de un sistema de seguimiento basado en el modelo anterior.* La hipótesis asociada a este objetivo establece que es necesario que los usuarios finales manejen un marco de referencia agronómico robusto para que sean capaces de incorporar información de PF en sus esquemas de toma de decisiones. Una predicción que se desprende de esta hipótesis es que serán los asesores de los sistemas de producción, más que los productores, los que utilizarán con más intensidad las estimaciones de PF que el sistema de seguimiento distribuirá.

El objetivo general del Capítulo 3 es mejorar las estimaciones de fRFAA. El objetivo específico es:

- *Identificar la metodología más apropiada para estimar fRFAA a partir de distintos IV.* La hipótesis asociada a este objetivo establece que la saturación de los IV más simples a altos niveles de área foliar y la variabilidad de color de suelo, debida a tipos y humedades de suelos contrastantes, dificulta la estimación de fRFAA a partir de información espectral. Una predicción que se desprende de esta hipótesis es que el índice de vegetación mejorado, un algoritmo planteado recientemente en la literatura, reflejará las variaciones de fRFAA más ajustadamente que el índice de vegetación normalizado, que es el algoritmo utilizado tradicionalmente.

El objetivo general del Capítulo 4 es mejorar nuestra capacidad de predecir las variaciones de EUR. Los objetivos específicos son:

- *Determinar, en una pastura consociada, el impacto relativo de déficits de disponibilidad de recursos y del manejo de la defoliación sobre la PF y sus dos componentes: la fRFAA y la EUR.* La hipótesis asociada a este objetivo establece que, como se ha observado en otros sistemas (Gastal y Durand 2000, Collino et al. 2005), los cambios de PF ante situaciones de estrés son determinados en mayor medida por la fRFAA que por la EUR. La predicción que se desprende es que los tratamientos de estrés reducirán más la fRFAA que la EUR respecto al control sin estrés.
- *Determinar, en la misma pastura, el impacto de la escala temporal sobre las variaciones de EUR ante situaciones de estrés.* La hipótesis asociada a este objetivo establece que la variabilidad de la EUR de pasturas a lo largo del tiempo es menor cuando se consideran períodos más prolongados que permiten que el canopeo ajuste su fRFAA a los niveles en equilibrio con la oferta de recursos del ambiente. La predicción que se desprende de esta hipótesis es que la bondad de ajuste de la relación PF-RFAA será mayor (es decir, la EUR menos variable) cuando se consideren períodos de tiempo más largos, por ejemplo, un mes vs. una semana.

CAPÍTULO 2. Diseño e implementación de un sistema de seguimiento de la productividad forrajera

2.1 Introducción

En regiones templadas la estacionalidad y la variación interanual de la productividad forrajera (PF) constituyen la principal restricción, tanto biofísica como económica, de los sistemas de producción ganaderos (Oosterheld et al. 1992, Oosterheld et al. 1998, Vallentine 2001, Diaz-Solis et al. 2006a). La carga animal es la variable de manejo con mayor impacto en los resultados de estos sistemas (Walker 1995, Diaz-Solis et al. 2003, Diaz-Solis et al. 2006b). Una vez definida, la carga animal es una variable mucho más estable que la productividad forrajera y ello suele conducir a períodos de escasez o de exceso de forraje que, si no son oportunamente corregidos con la utilización de suplementos y la confección de reservas, reducen la producción secundaria actual y potencial. En este contexto, el balance forrajero, una comparación sistemática de la oferta y la demanda de alimentos, y la cuantificación de las eficiencias, son herramientas de diagnóstico claves con las que cuentan los productores y asesores para planificar y evaluar decisiones de manejo de un modo racional y objetivo. Sin embargo, este tipo de herramientas de diagnóstico requieren como insumo una cuantificación sistemática de la PF (Stuth et al. 1993) para resultar razonablemente precisas.

Entre las aproximaciones más frecuentes para cuantificar la PF se encuentran las cosechas de biomasa repetidas en el tiempo y los modelos de simulación tradicionales. Estas metodologías enfrentan limitaciones para ser extensivamente implementadas a la escala de unidad de manejo, fundamentalmente porque la variabilidad espacial y estacional de los recursos forrajeros requiere alta intensidad de muestreo y repetición indefinida en el tiempo. Es por ello que las cosechas de biomasa se convierten en una alternativa extremadamente demandante de tiempo y esfuerzo si se pretende alcanzar una estimación representativa espacial y temporalmente de las unidades de manejo de un establecimiento (Sala y Austin 2000, Hirata et al. 2005). Por su parte, los modelos de simulación de pasturas han demostrado amplia utilidad en el ámbito científico (Johnson y Thornley 1983, 1985, McCall y Bishop-Hurley 2003, Peri et al. 2003, Corson et al. 2006). Sin embargo, requieren información detallada de parámetros o variables intermedias, como el índice de área foliar o características edáficas, que, al igual que las cosechas de biomasa, son muy difíciles de obtener de un modo representativo a la escala de lote en condiciones de producción (Donnelly et al. 2002, Diaz-Solis et al. 2003, Zhang et al. 2006).

Como se describió en el Capítulo 1, la PF también puede ser estimada con el modelo de la eficiencia en el uso de la radiación (EUR, Monteith 1972, Hill et al. 2004, Piñeiro et al. 2006, Reeves et al. 2006). Esta aproximación propone que la PF está determinada por la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA) por el canopeo, y la eficiencia con que esa energía es transformada en materia seca aérea. La RFAA es el producto entre la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA) y la fracción de esta que es absorbida por el canopeo (fRFAA). El modelo de la EUR ha sido ampliamente utilizada para estimar la productividad primaria bruta y neta a distintas escalas, desde parcelas de cultivo (Sinclair y Muchow 1999) hasta escala global (Running et al. 2000, Running et al. 2004). Una de las razones de la amplia difusión del modelo de la EUR es la posibilidad de estimar la fRFAA a partir de índices

de vegetación sencillos derivados de imágenes satelitales, como el índice de vegetación normalizado (Sellers 1985, Huete et al. 2002, Glenn et al. 2008).

Hasta hace unos pocos años, la estimación de la fRFAA de forma continua en el tiempo y a nivel de lote estuvo limitada por la baja resolución espacial de los sensores remotos proveedores de la información (Paruelo et al. 2000a, Reeves et al. 2001, Donnelly et al. 2002, Hill et al. 2004, Di Bella et al. 2005). En este sentido, el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), a bordo de las plataformas satelitales Terra y Aqua del Sistema de Observación Terrestres de la NASA (EOS-NASA), es un instrumento superador porque combina alta resolución espacial y temporal (tamaño de píxel <6ha y frecuencia de observación de un mismo sitio prácticamente diaria) con georreferenciación, correcciones atmosféricas y detección de nubosidad notablemente mejoradas respecto de los sensores utilizados anteriormente. Estas características son requisitos básicos para poder realizar un seguimiento de los recursos forrajeros a la escala de unidad de manejo.

Habitualmente, el problema de escasez de información o tecnología en relación al funcionamiento de sistemas complejos no se resuelve solo con generar y suministrar la información o tecnología en cuestión, sino que también es necesario guiar el proceso de adopción (Seelan et al. 2003). De hecho, la incorporación de la información o tecnología en el esquema de toma de decisiones de los usuarios finales es en ocasiones tan limitante como la ausencia de la información en sí misma (Campbell y Stafford Smith 2000, Cros et al. 2004). La función de los asesores y la organización de los productores en grupos agilizan este proceso ya que estos últimos prefieren adoptar las nuevas tecnologías asistidos por técnicos como intermediarios y porque el trabajo en grupos hace más fluidos y eficientes los procesos de asesoramiento y comunicación (Donnelly et al. 2002, Seelan et al. 2003). Para la comunidad científica, por su parte, participar en el proceso de adopción permite conocer las necesidades de los usuarios finales y, sobre la base de estas, orientar eventualmente las investigaciones y mejorar la calidad y el formato de las tecnologías en desarrollo (Jochec et al. 2001, Keating y McCown 2001).

Actualmente, la mayoría de los sistemas de producción ganadera extensiva del mundo son manejados sin una rutina de cuantificación de la producción forrajera. Los proyectos “Agrosat” (<http://www.agrosat.info>) en España, “GrassCheck” (<http://www.ruralni.gov.uk>) en Irlanda, y “SIMA-COAHUILA” (<https://sites.google.com/a/sima-coahuila.com/agostaderos-de-coahuila/home>) en México son ejemplos de esfuerzos preliminares en ese sentido, pero su escala espacial no se ajusta a la unidad de manejo de las explotaciones pecuarias y los métodos en que se basan no están publicados. El CSIRO de Australia desarrolló un sistema de seguimiento a nivel de lote (<http://www.pasturesfromspace.csiro.au>), parcialmente basado en los resultados de Hill et al. (2004) y aún está en una etapa de elaboración. Un sistema de seguimiento en tiempo real de la producción forrajera a nivel de lote, acompañado por el conocimiento necesario para integrarlo al sistema de toma de decisiones de los usuarios, constituirá una herramienta de manejo novedosa y contribuirá a optimizar la productividad y sustentabilidad de los sistemas de producción ganadera que se basan en la propia producción de forraje. El objetivo general de este capítulo es diseñar e implementar un sistema de seguimiento de la productividad forrajera en tiempo real y a la escala de lote, y facilitar su adopción para que sea utilizado como herramienta de manejo en sistemas de producción ganaderos. Los objetivos específicos son:

- *Diseñar un modelo preliminar de estimación de la PPNA basado en la bibliografía existente y en calibraciones empíricas para estimar la EUR.* La hipótesis asociada a este objetivo establece que las variaciones de la EUR de un recurso

forrajero particular (grupo de especies en un tipo de suelo determinado) a lo largo del tiempo (*i.e.* debidas al clima) son menores que las variaciones de la EUR entre recursos forrajeros distintos. Una predicción que se desprende de esta hipótesis es que al relacionar las variaciones temporales de la PF en función de la RFAA se obtendrán modelos de regresión significativamente distintos para los distintos recursos forrajeros.

- *Distribuir y evaluar el uso de un sistema de seguimiento basado en el modelo anterior.* La hipótesis asociada a este objetivo establece que es necesario que los usuarios finales manejen un marco de referencia agronómico robusto para que sean capaces de incorporar información de PF en sus esquemas de toma de decisiones. Una predicción que se desprende de esta hipótesis es que serán los asesores de los sistemas de producción, más que los productores, los que utilizarán con más intensidad los informes que el sistema de seguimiento distribuirá.

2.2 Metodología

2.2.1 Descripción de la zona y los sistemas de producción

El trabajo estará focalizado principalmente en sistemas de producción del sudoeste de la provincia de Buenos Aires. En esta región, el clima es templado sub-húmedo. La precipitación media anual varía entre 800 y 900 mm y es más abundante en primavera y verano (70%). En invierno suelen ocurrir sequías por las escasas precipitaciones, pero también son frecuentes en verano por los elevados niveles de evapotranspiración. La temperatura media mensual varía entre 7-9 °C en julio y 21-22 °C en enero. Entre abril y octubre ocurren alrededor de 80 heladas agronómicas (intemperie a 5 cm del suelo) cada año. Los suelos dominantes son Molisoles, en algunos casos limitados por presencia de tosca, salinidad o anegamientos temporarios. Existen dos grandes unidades a la escala de paisaje, caracterizadas por diferentes regímenes hídricos y salinos: las lomas ocupadas por una rotación agrícola-ganadera de 4x4 años, y los bajos ocupados permanentemente por pastizales naturales o pasturas de agropiro (*Agropyron elongatum* = *Elytrigia elongata*) naturalizadas. Las pasturas de loma en general son mezclas consociadas e involucran algunas de estas especies: *Festuca arundinacea*, *Dactylis glomerata* y *Lolium multiflorum* como gramíneas, y *Medicago sativa*, *Trifolium pratense* y *Trifolium repens* como leguminosas. Durante el período agrícola de la rotación, los cultivos de invierno son trigo y cebada, y los de verano girasol, soja y maíz en menor medida.

Los sistemas de producción analizados en este Capítulo constituyen la zona sudoeste de AACREA (Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola, <http://www.aacrea.org.ar>). Esta institución tiene por objetivos fomentar el desarrollo de empresas agropecuarias rentables y sustentables mediante el intercambio de experiencias y la incorporación de tecnologías, y transferir ese conocimiento para contribuir al desarrollo del país. AACREA está organizada en zonas dentro de las cuales hay grupos de aproximadamente 10 miembros cada uno. En general los miembros del grupo comparten un asesor que realiza visitas mensuales de un día a cada empresa, y mantienen reuniones grupales mensuales en uno de los campos que va rotando cada mes. Las reuniones tienen un formato estándar que básicamente consiste en evaluar cada campo en relación a la condición de los animales y el forraje, el estado de los cultivos, y las principales actividades productivas que están desarrollando. Se pone especial atención en la empresa anfitriona, incluyendo una recorrida a campo. Esta interacción intensa generalmente resulta en que los productores muestren rasgos productivos comunes: en relación a la

producción ganadera, utilizan pastoreo rotativo con suplementación variable durante el invierno, especialmente para las categorías en engorde.

2.2.2 El sistema de seguimiento forrajero

Diseñamos un sistema de seguimiento que genera estimaciones de PF a escala de lote con paso mensual. El sistema utiliza información de radiación solar incidente, índices de vegetación derivados de imágenes satelitales, coeficientes calibrados de EUR, e información de uso de la tierra. A continuación se describe en mayor detalle el papel de cada una de estas variables en el funcionamiento del sistema de seguimiento.

Durante el trabajo la radiación solar incidente diaria se obtuvo de una estación agro-meteorológica centrada en la región de estudio (37°24'17.8" S, 61°26'27.4" O, altitud 200 msnm). Estos datos se utilizaron para las estimaciones en los campos de la zona que tiene forma casi circular con un diámetro de ~150km. La radiación fotosintéticamente activa (RFA) se calculó como el 48% de la radiación solar incidente (McCree 1972).

Se utilizó el índice de vegetación normalizado (IVN) del proyecto MODIS (MOD 13 versión 4, <http://lpdaac.usgs.gov/main.asp>). El IVN se calcula como: $IVN = (pred - pnir) / (pred + pnir)$, donde pred: reflectancia en la longitud de onda del rojo, 620-670 nm; pnir: reflectancia en la longitud de onda del infrarojo cercano, 841-876 nm. El producto MOD 13 consiste en compuestos temporales de 16 días disponibles en cuatro resoluciones espaciales, de las cuales utilizamos la más detallada: 250 m de tamaño de píxel (~6ha). El producto incluye información para la evaluación de calidad del dato de IVN por píxel. Así, se descartaron los valores de píxeles que no tuvieran máxima calidad y se reemplazaron utilizando una interpolación lineal de la fecha anterior y posterior (corrección menor al 2% de las observaciones, mayormente debido a las condiciones de nubosidad).

La fRFAA se estimó a partir del IVN sobre la base de una función curvilínea ampliamente utilizada en trabajos anteriores (Gallo et al. 1985, Potter et al. 1993, Sellers et al. 1996, Le Roux et al. 1997, Los et al. 2000, Piñeiro et al. 2006). La forma no lineal de esta función representa la saturación descrita para el IVN a altos valores de Índice de Área Foliar (IAF), e implica una relación lineal entre otro IV, el Cociente Simple ($CS = (1 + IVN) / (1 - IVN) = pred / pnir$), y la fRFAA. La relación se parametrizó para las condiciones locales asignando 0% fRFAA a valores de IVN correspondientes a píxeles con ausencia total de material vegetal verde (suelo desnudo o rastros agrícolas sin malezas) y 95% de fRFAA a valores de IVN correspondientes a píxeles con máxima interceptación (pasturas con IAF >3 o cultivos de trigo de alto rendimiento durante floración). Para ello se consideraron 50 lotes de cada situación de fRFAA dentro de la región de estudio. La ecuación resultante fue:

$fRFAA = \min [CS / (CS_{max} - CS_{min}) - CS_{min} / (CS_{max} - CS_{min}), 0.95]$,
donde $CS_{max} = 11.62$, y $CS_{min} = 1.55$.

Se caracterizó empíricamente la EUR promedio de los dos recursos forrajeros principales de la región: las pasturas de loma y las pasturas de agropiro naturalizado en los bajos. Para ello se utilizaron estimaciones de PF surgidas de cosechas de biomasa repetidas en el tiempo generadas por el grupo CREA Lamadrid entre octubre de 2000 y octubre de 2003. Estas cosechas tuvieron lugar en 8 sitios (lotes), 4 representando a pasturas de loma y 4 a pasturas de agropiro. Los agrónomos que diseñaron el plan de cortes intentaron representar las condiciones de pastoreo rotativo a las que habitualmente se encuentran sujetos estos recursos forrajeros. En cada sitio

se utilizaron 8 jaulas de 1x1m, dentro de las cuales se defoliaba a una altura de 4 cm y luego de un período de rebrote de duración variable (entre 40 y 90 días) se volvía a defoliar a la misma altura para estimar la biomasa total (verde más muerto en pie) generada en el período. Luego, la PF se calculó como el incremento total de biomasa (verde más muerto en pie) en el período. La PF se expresó en Kg/ha/60 días para normalizar los valores a la duración promedio de los períodos de rebrote. Por otra parte, para cada lote y período de rebrote se calculó la radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA) a partir de la RFA incidente y de la fRFAA (derivada de imágenes MODIS) específica para ese sitio y período. Con esta información se generaron modelos de regresión de PF en función de RFAA, como una estimación de la EUR promedio (Demetriades-Shah et al. 1992, Le Roux et al. 1997).

Para evaluar la capacidad predictiva de estos modelos se generaron nuevos modelos de regresión utilizando solo un subconjunto de los datos y reservando los otros para contrastarlos con las predicciones. Este análisis se realizó en forma independiente para cada recurso forrajero (pasturas de loma y bajos con agropiro). De los 18 períodos de rebrote disponibles (n) se utilizaron 15 valores para generar los modelos y 3 para evaluarlos. Este procedimiento se repitió 5 veces utilizando cada vez combinaciones aleatorias de datos para la generación y evaluación de los modelos (Manly 1997, Piñeiro et al. 2006).

Se construyó y se mantuvo un Sistema de Información Geográfico (SIG) con todos los sistemas de producción (establecimientos) que participaron del proyecto. La mínima unidad del SIG fue la unidad de manejo o lote, representados por polígonos georreferenciados con alta precisión (error ~20 m). En el SIG cada lote tuvo asociado su área, el establecimiento al que pertenecía, el uso de la tierra para cada ciclo de producción (desde el año 2000), y un número variable de píxeles que lo representaron. Esos píxeles fueron seleccionados al interceptar los lotes con una grilla en la que cada celda coincidía exactamente con el tamaño y ubicación de los píxeles de las imágenes MODIS. Así, se seleccionó cada píxel completamente incluido en un lote como representativo del mismo. Entre los lotes con por lo menos un píxel, el percentil 25, 50 (mediana), y 75 fue de 1, 2 y 5 píxeles por lote respectivamente. Durante el proyecto el SIG fue muy dinámico debido a las modificaciones en los límites de los lotes que ocurren en el campo, y a la necesidad de cargar el uso de la tierra anualmente al inicio de cada ciclo productivo. Este proceso requirió comunicación fluida con los productores, lo cual fue claramente facilitado por su organización en grupos, y por la presencia del asesor común.

Se generó un software específico, llamado *Segf*, que consta de una Base de Datos Relacional que almacena y maneja la información del sistema de seguimiento. Los procedimientos computacionales fueron automatizados como rutinas programadas en C++ (programador Víctor Suárez) y son operados por una interfase específica que permite cargar toda la información requerida por el sistema para generar las estimaciones de PF: RFA incidente, IVN e información asociada de calidad proveniente de las imágenes MODIS para los píxeles que representan lotes, valores de EUR para cada recurso, uso de la tierra por lote, y la información espacial que relaciona los píxeles a lotes y los lotes a campos. Durante el proyecto las estimaciones se generaron alrededor del día 10 de cada mes, luego de actualizar la información de RFA incidente, IVN, calidad de las imágenes, y cualquier cambio del SIG del mes anterior. Los informes consistían en planillas Excel con la información de PF a la escala de lote para cada mes desde febrero de 2000 hasta la actualidad, y se distribuían por correo electrónico (Fig. 2.1).

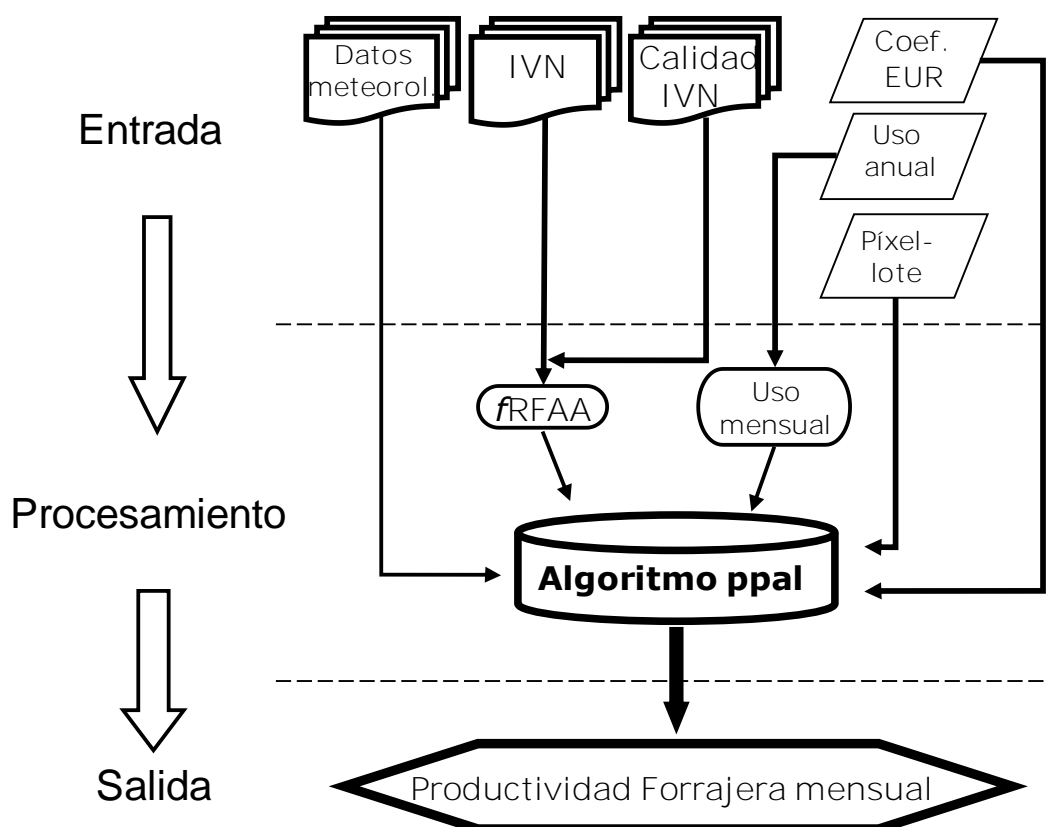


Figura 2.1. Diagrama de flujo de los principales procesos de cálculo del sistema de seguimiento de la productividad forrajera. El algoritmo principal está basado en el modelo de la eficiencia en el uso de la radiación (EUR). Algunos datos de entrada son actualizados mensualmente (ícono de varias capas) y otros con menor frecuencia (íconos de una sola capa), por ejemplo el uso anual es actualizado anualmente y los coeficientes de EUR son actualizados solo si se genera nueva información al respecto. IVN, índice de vegetación normalizado; Calidad IV, información de calidad de las imágenes satelitales (presencia de aerosoles y/o nubosidad); fRFAA, fracción de la radiación fotosintéticamente activa incidente absorbida por la vegetación.

2.2.3 Evaluación de la utilización por usuarios

Participamos regularmente de reuniones con los productores y asesores que formaron parte del proyecto para (1) explicar las bases y aplicaciones del sistema de seguimiento de modo de facilitar su adopción y (2) conocer sus opiniones e impresiones respecto de la precisión, formato, y utilidad de la información distribuida. Se realizó una encuesta a los asesores de ocho grupos de productores para cuantificar el grado de adopción, las limitaciones principales, y las diferencias entre asesores y productores respecto de la utilización del sistema.

2.3 Resultados

2.3.1 Evaluación de las estimaciones de PF

La duración de los períodos de rebrote entre las cosechas de biomasa realizadas para estimar la PF fue variable y en ciertas ocasiones determinada por cuestiones logísticas más que por aspectos ecofisiológicos. La suma térmica ($T_b = 4.5$ °C) del rebrote varió entre 212 y 1200°C día y excedió el valor estimado de vida media foliar de festuca (aproximadamente 600°C día (Lemaire y Agnusdei 2000)) en 7 de los 18 períodos de rebrote evaluados (Tabla 2.1).

# Cosecha	Fecha media	Duración (días)	Suma Térmica (°C día)
1	3-Nov-00	41	392
2	18-Dec-00	50	741
3	18-Feb-01	74	1200
4	24-Apr-01	55	384
5	25-Jun-01	70	248
6	1-Sep-01	66	366
7	7-Nov-01	68	727
8	8-Jan-02	56	901
9	6-Mar-02	58	756
10	6-May-02	63	430
11	22-Jul-02	91	275
12	30-Sep-02	49	392
13	18-Nov-02	49	595
14	9-Jan-03	56	942
15	8-Mar-03	59	810
16	12-May-03	72	442
17	23-Jul-03	71	212
18	23-Sep-03	53	393

Tabla 2.1. Fecha media, duración en días y suma térmica de los 18 períodos de rebrote para los que se estimó la PF. Las fechas de cosecha fueron las mismas para pasturas de loma y bajo.

2.3.2 Bases del sistema: calibración y evaluación de la EUR

La RFAA derivada a partir del IVN del sensor MODIS y de la radiación solar incidente siguió muy de cerca las variaciones de PF (Fig. 2.2, Coeficiente de Variación promedio de las estimaciones de biomasa: CV= 0.3). La relación entre PF y RFAA, para cada recurso forrajero, fue: $PF = 0.6 * RFAA + 12$, ($R^2 = 0.86$; $p < 0.001$; $n = 18$) para las pasturas de loma, y $PF = 0.27 * RFAA + 26$, ($R^2 = 0.74$; $p < 0.001$; $n = 18$) para las pasturas naturalizadas de bajo, con PF en g/m²/60 días y RFAA en MJ/m²/60 días (Fig. 2.3). Estos modelos son utilizados por el algoritmo principal del sistema de seguimiento para calcular la PF de ciertos recursos forrajeros en función de la RFAA. Los modelos de EUR generaron estimaciones de PF que se asociaron con datos de PF estimados a campo en forma independiente (Fig. 2.4). Los valores observados y predichos de PF estuvieron estrechamente relacionados (pasturas de loma: $R^2=0.87$, error cuadrático medio, RMSE=49 g/m²/60 días, sesgo promedio=+6%; pasturas naturalizadas de bajo: $R^2=0.72$, RMSE=21g/m²/60 días, sesgo promedio=-8%).

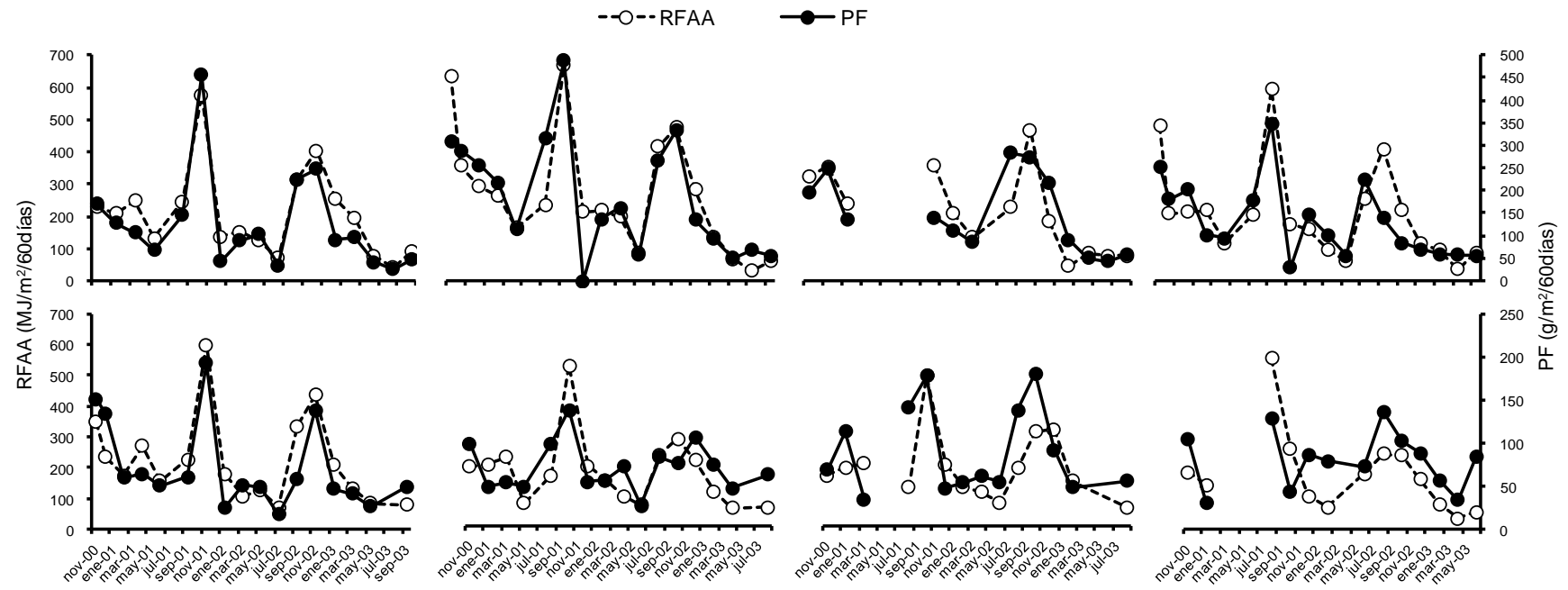


Figura 2.2. Estimaciones de productividad forrajera (derivada de cosechas de biomasa) y de radiación fotosintéticamente activa absorbida (derivada del índice de vegetación normalizado, IVN, del sensor MODIS y de la radiación fotosintéticamente activa incidente) para cuatro pasturas de loma (panel superior) y cuatro pasturas naturalizadas de bajo (panel inferior).

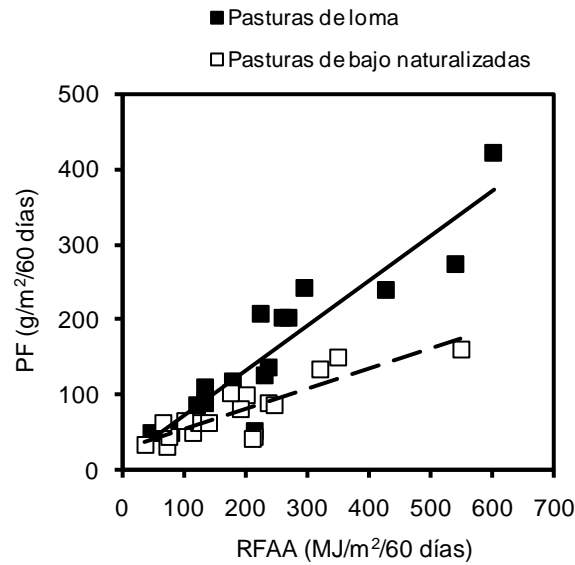


Figura 2.3. Calibraciones entre estimaciones de productividad forrajera (PF, derivada de cosechas de biomasa) y radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA, derivada del índice de vegetación normalizado, IVN, del sensor MODIS y de la radiación fotosintéticamente activa incidente). Cada punto es la PF y RFAA promedio, en cada fecha, de los cuatro sitios de la figura 2.2.

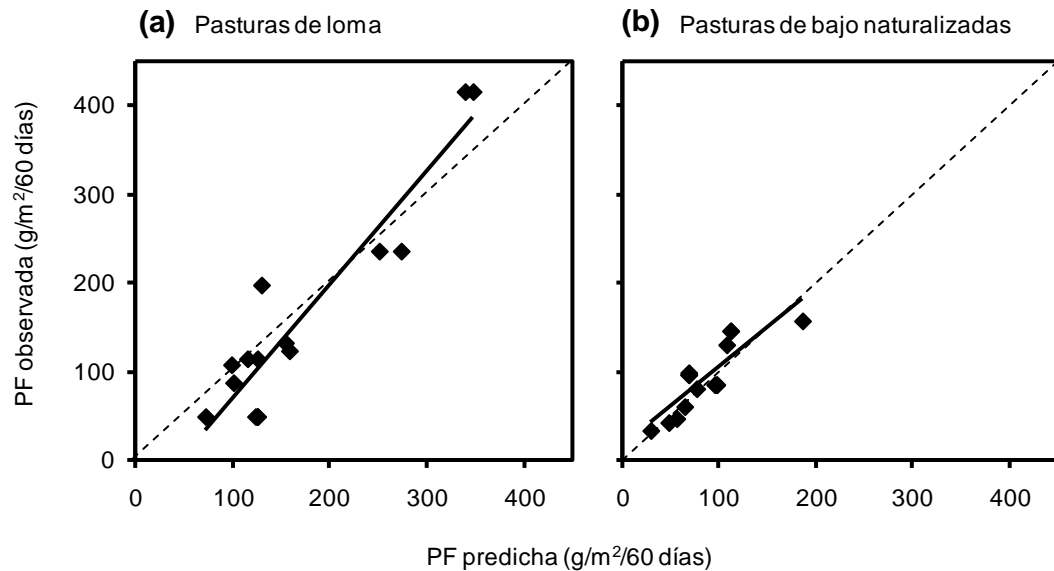


Figura 2.4. Relación entre los valores observados y predichos de productividad forrajera (PF). Los valores observados no formaron parte de la generación de los modelos utilizados para predecir la PF. (a) Pasturas de loma, (b) Pasturas naturalizadas de bajo.

2.3.3 Seguimiento de la productividad forrajera

Dentro del área original del proyecto, y en el marco de esta tesis, se realizó un seguimiento forrajero continuo en el tiempo de un total de 542.000 ha, correspondientes a 167 campos de 8 grupos CREA involucrados en este desarrollo tecnológico. Además, el

sistema de seguimiento se ha extendido a otras áreas del país como proyecto basado en esta tesis pero independiente de la misma, y en total se realiza actualmente (diciembre de 2009) el seguimiento forrajero de 1.478.000 ha. Todos los meses los asesores y productores descargan el informe forrajero actualizado de la página web del sistema de seguimiento, utilizando su usuario y contraseña. El informe consiste en un archivo MS Excel que contiene una hoja de cálculo y una consulta en forma de tabla dinámica con una figura asociada. Como ejemplo, en la página web del sistema (<http://larfile.agro.uba.ar/lab-sw/sw/gui/Inicial.page>) se puede descargar un informe típico que contiene estimaciones de PF para diferentes recursos forrajeros a nivel de lote desde febrero de 2000.

Los informes muestran aspectos clave de la dinámica de los recursos forrajeros. Por ejemplo, la Fig. 2.5 muestra la PF mensual desde marzo de 2000 para uno de los grupos de productores. Estos patrones de variación son el promedio de un gran número de lotes (~130, dependiendo de la dimensión del grupo). Las pasturas de loma son mucho más productivas que las pasturas naturalizadas de bajo, especialmente en primavera, cuando las condiciones climáticas suelen permitir que las pasturas de loma expresen altas tasas de crecimiento. Sin embargo, ambos recursos forrajeros muestran un patrón estacional similar: un pico en primavera, una caída a lo largo del verano, luego un leve pico durante el otoño dependiente del año, y un período menos productivo durante el invierno.

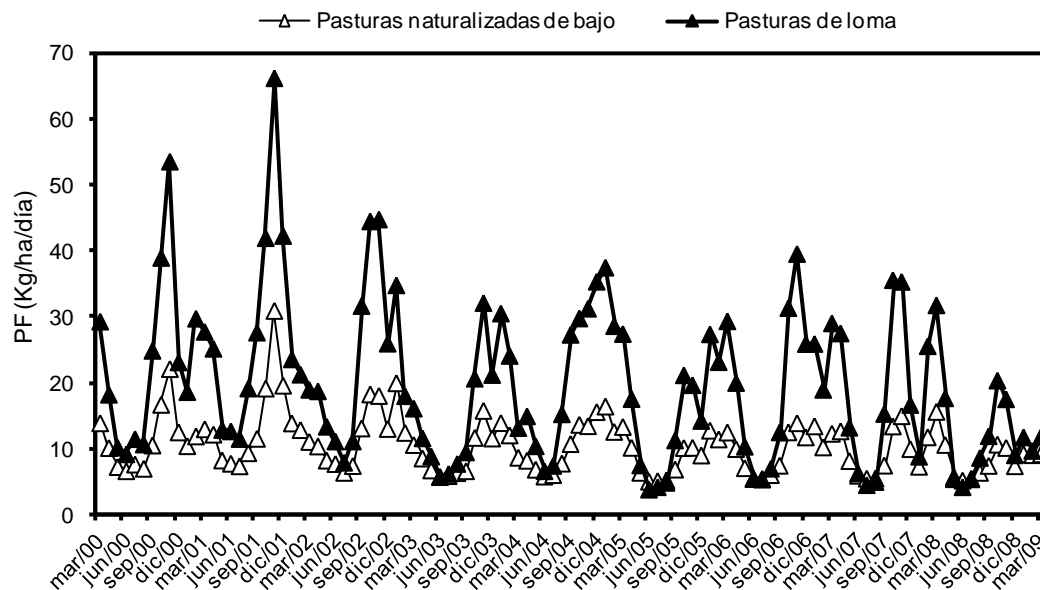


Figura 2.5. Productividad forrajera diaria promedio de todos los lotes con pasturas de loma y con pasturas naturalizadas de bajo del grupo CREA Lamadrid.

Seleccionando un establecimiento de interés en la consulta del informe, se pueden ver las curvas de PF para cada lote (Fig. 2.6). Existen diferencias relacionadas al tipo de recursos forrajeros, pero también diferencias entre lotes con los mismos recursos. La PF solo se calcula para un lote durante el período durante el cual el uso de la tierra corresponde a un recurso forrajero; debido a esto, algunos lotes en la Fig. 2.6 no tienen información durante algunos meses o años.

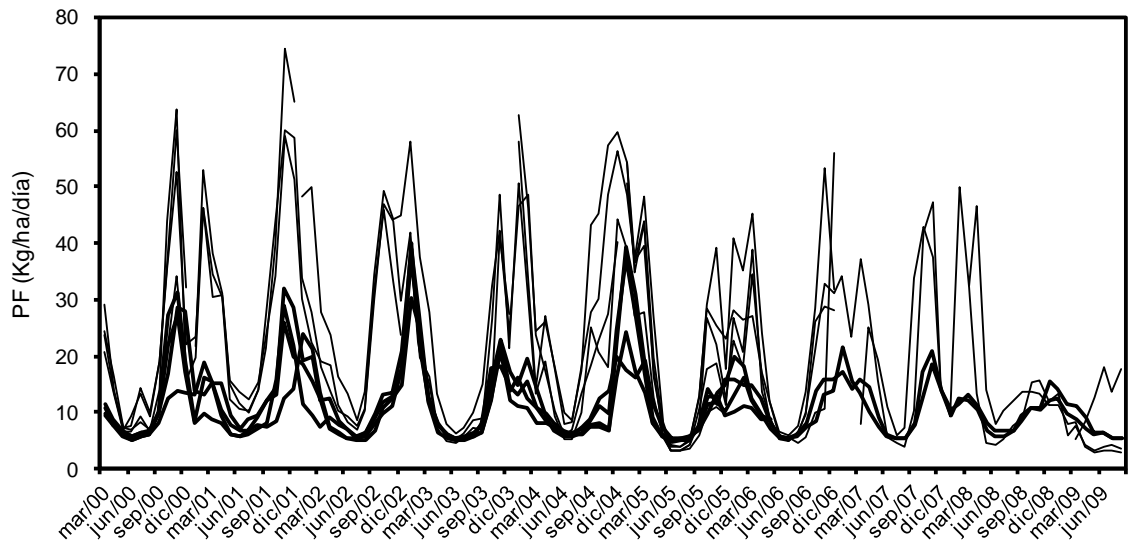


Figura 2.6. Productividad forrajera diaria promedio por lote para un campo particular (Estancia San Juan). Las líneas finas representan lotes con pasturas de loma, y las líneas gruesas lotes con pasturas naturalizadas de bajo.

La distribución de frecuencias de PF de los lotes para un mes en particular permite hacer una comparación entre lotes y entre años. Por ejemplo, para los últimos nueve años, se puede obtener la distribución de frecuencias de la PF de septiembre, el mes que generalmente marca el cambio de tasas de crecimiento de invierno a primavera (Fig. 2.7). Se puede ver una variabilidad considerable tanto entre años como entre lotes, especialmente en las pasturas de loma. Por ejemplo, en años de baja productividad (2003, 2005) la productividad promedio en septiembre fue ≈ 8 kg/ha/día, mientras que en años más productivos (2001 y 2002) fue ≈ 28 kg/ha/día.

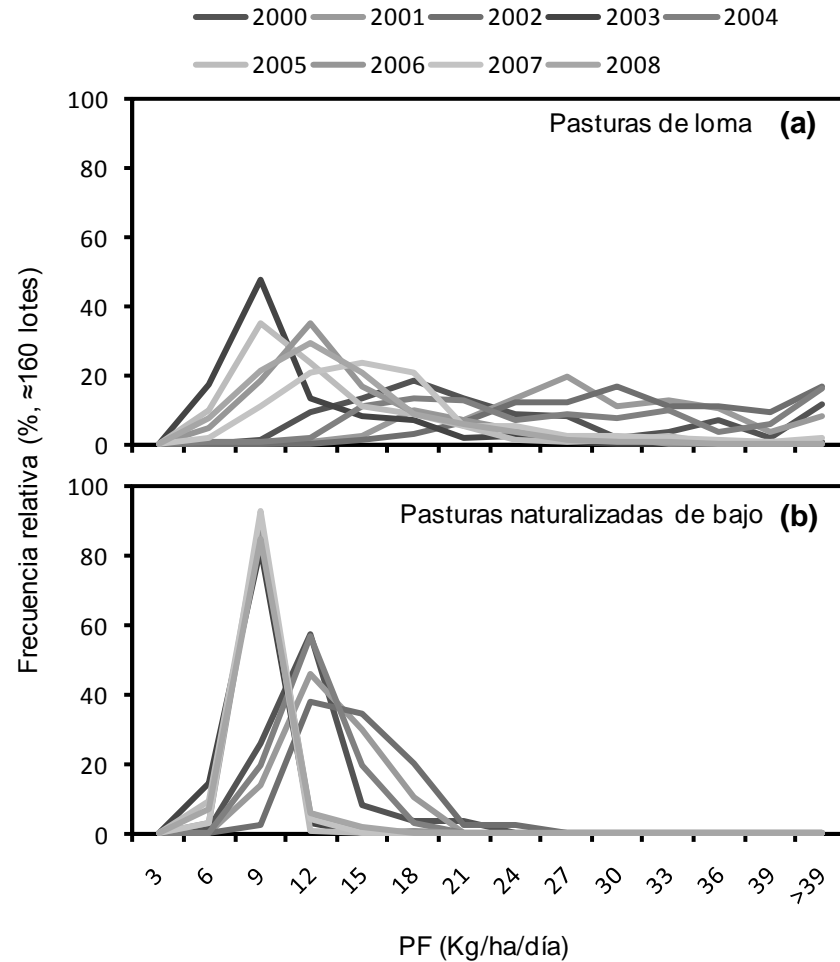


Figura 2.7. Distribución de frecuencia de la productividad forrajera por lote para el mes de septiembre en los últimos 9 años. (a) Pasturas de loma, (b) Pasturas naturalizadas de bajo. El número total de lotes en las distribuciones de frecuencias fue, en promedio para los nueve años, de 158 para las pasturas de loma y de 93 para las Pasturas naturalizadas de bajo.

2.3.4 Utilización por los productores y asesores

Los asesores y productores utilizan las estimaciones de crecimiento de forraje contenida en los informes mensuales de acuerdo a sus objetivos y creatividad. Habitualmente se utiliza la información como base para el balance forrajero, y los análisis que de él se derivan se pueden dividir en aquellos cuyo objetivo es tomar decisiones de manejo de la campaña en curso y en aquellos que tratan de explicar resultados productivos de campañas anteriores. La toma de decisiones sobre el movimiento de animales de acuerdo a la PF del último mes está dentro del primer grupo de análisis y en esos casos los asesores combinan la información de PF del mes anterior con los datos históricos para el mes en curso como forma de estimar la PF para los próximos días o semanas.

Dentro del segundo tipo de análisis, contar con la información provista por el sistema permitió mostrar que el mantenimiento de los niveles de producción de carne en los ciclos de producción de baja PF está asociado a un aumento en el uso de grano como suplemento (Fig. 2.8). Sin embargo, cuando la productividad cae a valores tan bajos como

en el ciclo 2008-2009 los niveles de producción de carne tendieron a reducirse aunque la suplementación haya estado en los niveles más altos de la serie.

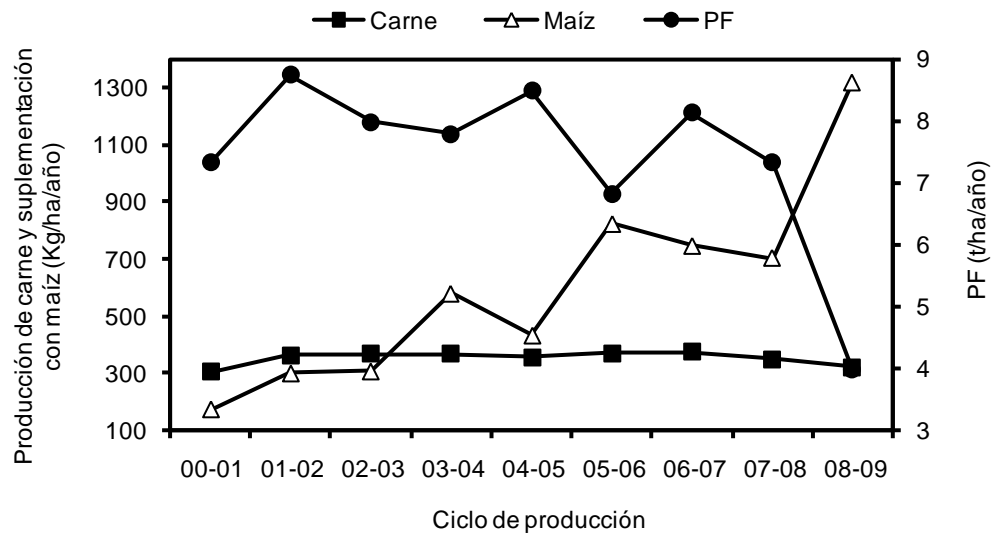


Figura 2.8. Producción de carne, suplementación con grano de maíz, y productividad forrajera anual promedio de los distintos recursos forrajeros del establecimiento San Juan para los últimos 9 ciclos de producción. Análisis generado por Fernando Pacín, asesor del CREA Lamadrid.

Otro ejemplo de este segundo tipo de análisis es la comparación de las eficiencias productivas en diferentes establecimientos (Fig. 2.9): la tasa con la cual la PF es transformada en producción de carne es altamente variable entre campos. A partir de este diagnóstico se pueden derivar estrategias claramente diferentes para aumentar la producción de carne: algunos campos necesitan aumentar la producción de forraje mientras que otros necesitan aumentar la eficiencia de utilización y/o la calidad del forraje producido.

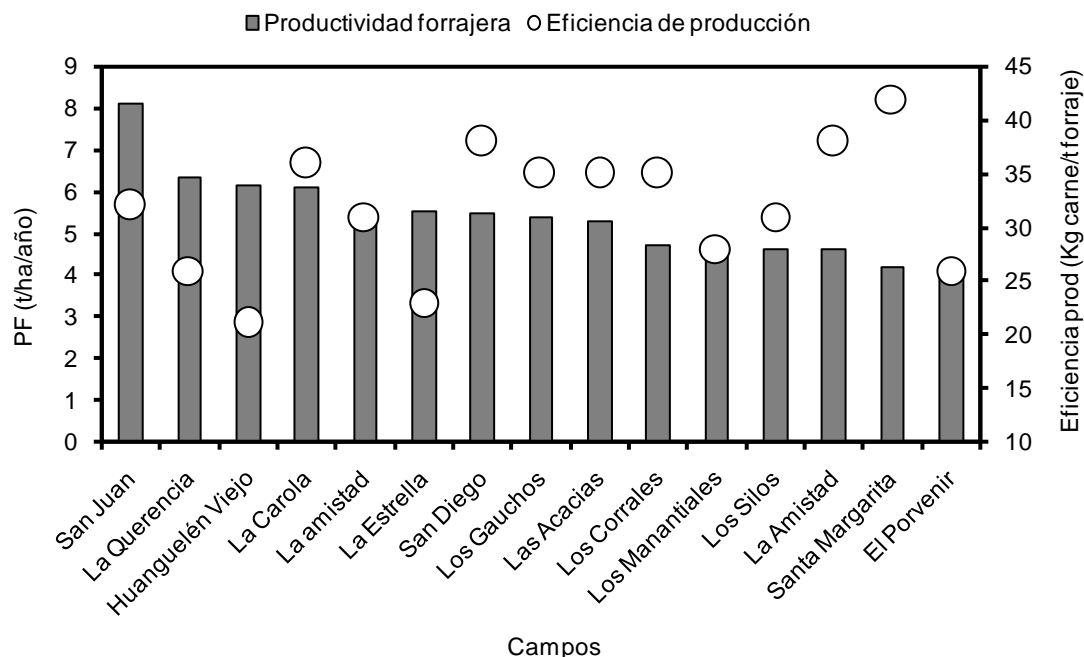


Figura 2.9. Productividad forrajera anual (promedio del establecimiento) y eficiencia de producción (definida como kg de carne producidos por tonelada de forraje producida, descontando la carne producida a expensas de suplementación) para los campos del grupo CREA Lamadrid en el ciclo de producción 2005-2006. Análisis generado por Fernando Pacín, asesor del CREA Lamadrid.

Con el doble propósito de facilitar el uso de esta tecnología por los usuarios finales y de realizar un seguimiento del grado de utilización, participamos en 35 reuniones de extensión durante los dos primeros años del proyecto. Esta intensa interacción y la encuesta realizada específicamente para conocer el grado de utilización, revelaron que este sistema de seguimiento en tiempo real fue aceptado satisfactoriamente y usado por los productores y asesores (Tabla 2.2). Sin embargo, existen diferencias entre grupos y entre los asesores y los productores: mientras todos los asesores utilizan frecuentemente el sistema de seguimiento (por lo menos una vez cada tres meses) para realizar, controlar, o corregir el balance forrajero del año en curso, una proporción menor de los productores (19%) hacen eso. Por otra parte, la mayoría de los asesores utilizan también el sistema una vez al año para el análisis del ciclo de producción anterior. En cambio este fue uno de los usos más frecuentes entre los productores (Tabla 2.2).

Utilización de los informes de productividad forrajera en la zona sudoeste de AACREA *

Porcentaje de asesores o productores que:	% de asesores	% de productores
	Total: 8	Total: 83
Abrieron por lo menos una vez el informe	100	77
Utilizan frecuentemente (al menos una vez cada tres meses) el informe para realizar/controlar/corregir el balance forrajero del ciclo productivo en curso	100	19
Utilizan anualmente el informe para analizar los resultados del ciclo productivo anterior	88	35
Utilizan ocasionalmente el informe para realizar análisis particulares	0	30
Utilizan el informe con otros objetivos	88	8
No utilizan el informe por:		
1. su elevada complejidad	0	34
2. su baja precisión	0	6
3. dificultades en utilizar información de productividad forrajera para tomar decisiones	0	40

* Los valores dentro de cada columna no son aditivos porque en la encuesta las alternativas fueron no excluyentes.

Tabla 2.2. Encuesta realizada a los asesores de los ocho grupos de la zona sudoeste de AACREA. Los asesores contestaron la encuesta por ellos mismos y por los productores a los que asesoran.

2.4 Discusión

Se desarrolló un sistema de seguimiento que genera estimaciones mensuales de productividad forrajera a nivel de lote, y envía la información a los asesores y productores que la utilizan como una herramienta de manejo. El sistema está basado en el marco conceptual de la EUR (Monteith 1972, Running et al. 2004), el IVN del sensor MODIS (Huete et al. 2002), y la interacción con grupos de productores. El modelo de la EUR, a la vez sencillo y con base mecanística, permitió combinar información de teledetección de la vegetación con mediciones detalladas a campo de PF para generar calibraciones para cada tipo de recurso forrajero. Además, la resolución espacial de 250 m de las imágenes de IVN del sensor MODIS resultó superadora de la clásica relación de compromiso entre resolución espacial y temporal presente en sensores utilizados anteriormente, permitiendo el seguimiento individual de pequeñas áreas. Finalmente, la organización de productores en grupos con un mismo asesor facilitó el intercambio de información (por ejemplo, sobre las rotaciones de uso de miles de lotes) y la comunicación (por ejemplo, para recibir sugerencias de los productores) en un proyecto cuyo objetivo fue generar una herramienta de manejo. Como resultado, los sistemas de producción ganaderos cuentan

actualmente con una herramienta que permite un esquema de manejo más racional, tanto en relación al análisis del ciclo de producción pasado como a la planificación.

El comportamiento relativamente estable mostrado por la EUR en este trabajo entre estaciones del año y entre años facilitó el uso del modelo de la EUR para el sistema de seguimiento forrajero. Considerando los valores de PF para la región (Paruelo et al. 2000b, Piñeiro et al. 2006), la serie de tres años utilizada para la calibración fue muy conveniente porque incluyó años de alta y baja PF (2001 y 2003 respectivamente, principalmente determinados por disponibilidad hídrica). A pesar de este amplio rango de valores de PF, que incluye gran parte de la variación esperada en otros años, la RFAA siguió muy de cerca a la PF. Este comportamiento relativamente estable de la EUR tanto entre estaciones como entre años climáticamente distintos podría en parte ser consecuencia de la escala temporal a la cual se calculó la PF (Medlyn 1998), y de la rápida respuesta del área foliar de estas pasturas a los factores ambientales (Posse et al. 2005). Por ejemplo, una sequía de corta duración probablemente reduzca la EUR por unos días, pero tal condición de estrés también restringiría rápidamente la expansión foliar, la cual (sumada al acartuchamiento foliar y a un aumento de la senescencia) reduciría la fRFAA y, entonces, la RFAA. Integradas en un período más largo, dos meses por ejemplo, la mayor parte de las variaciones de PF podrían explicarse por estos cambios de RFAA y solo una porción marginal por cambios de EUR. Esto estaría en línea con la teoría del balance de recursos, que establece que la adquisición de radiación por parte de la vegetación puede reducirse ante la presencia de otros factores más limitantes para el crecimiento (Field et al. 1995, Joel et al. 1997, Glenn et al. 2008). El efecto de la escala temporal sobre la EUR bajo condiciones de estrés será estudiado en mayor detalle en el Capítulo 4 de esta tesis. Pero independientemente de cuál sea el mecanismo subyacente del comportamiento estable de la EUR, la fuerte relación empírica observada en este trabajo entre las estimaciones a campo de PF y RFAA derivada de imágenes satelitales resulta útil para realizar el seguimiento detallado de la PF de lotes a escalas mensuales y bimensuales (ver más abajo las limitaciones del protocolo de cosechas a campo utilizado), que son escalas relevantes para la toma de decisiones en sistemas de producción ganaderos.

En sistemas de producción ganaderos bajo pastoreo, la carga animal es la variable de manejo con mayor impacto sobre la productividad animal por hectárea (Walker 1995, Diaz-Solis et al. 2003). Por su parte, la PF es la variable principal que limita la carga animal, especialmente si no se usan suplementos (Oosterheld et al. 1992). Combinando estas dos variables es posible definir una función riesgo: el aumento de la carga animal está asociado a un aumento del riesgo productivo, pero esa relación depende altamente del patrón de variabilidad de la PF, que a su vez depende del tipo de recurso forrajero y de las condiciones agroclimáticas. Sin embargo, el nivel de riesgo asociado a determinada carga animal generalmente es desconocido debido a la falta de información sobre la cantidad y la variabilidad de la PF (Kaine y Tozer 2005). El sistema de seguimiento presentado en este capítulo resuelve este problema porque genera esta información de forma cuantitativa para una gran combinación de recursos forrajeros, tipos de suelos, y sistemas de manejo, para una serie temporal – hasta el presente- de diez años. La suplementación puede mantener los niveles de producción de carne en valores estables incluso en años con baja PF (Fig. 2.8), pero con costos de producción sensiblemente más elevados. En estos casos, el riesgo productivo (probabilidad de que la PF no alcance a la demanda animal) se puede aplicar a una perspectiva económica: ¿cuán frecuentemente los resultados económicos serán negativos para diferentes escenarios de carga animal considerando las series temporales reales de PF?

El proyecto tuvo el objetivo explícito de constituir al sistema de seguimiento como una herramienta de manejo. La frecuente interacción con los asesores y productores guió ciertos aspectos del diseño y la implementación del sistema en el sentido de satisfacer las necesidades particulares de los usuarios finales. Algunos ejemplos de estos ajustes son la clasificación de los recursos forrajeros en diferentes tipos de pasturas, la definición de una relación estandarizada entre el uso de la tierra anual y mensual, el paso mensual de las estimaciones de productividad, y el formato y vía de distribución de los informes. En relación al formato, por ejemplo, los usuarios prefirieron que el informe fuera una hoja de cálculo con la cual ellos pudieran realizar sus análisis, en lugar de un mapa, que fue considerado como una descripción más cualitativa. A pesar de que tanto los asesores como los productores fueron los usuarios finales del sistema de seguimiento, los asesores tuvieron un rol adicional como facilitadores de la adopción de esta nueva tecnología por parte de los productores, tal como ha sido observado en trabajos de extensión anteriores (Seelan et al. 2003). Como resultado de esto, el grado de utilización del sistema en un grupo particular estuvo altamente influenciado por la actitud del asesor hacia el proyecto. La encuesta realizada reveló que la mayoría de los asesores utiliza regularmente el sistema mientras que una parte menor (19%) de los productores lo utilizan, que son, según los asesores, fundamentalmente aquellos productores que también son ingenieros agrónomos. Es posible que este patrón esté asociado a que los asesores y los productores ingenieros agrónomos manejen mejor el marco conceptual que se requiere para incluir estimaciones cuantitativas de productividad forrajera en el manejo del pastoreo. En efecto, la planificación del balance forrajero es uno de los aspectos de manejo sobre el que los productores necesitan más asesoramiento, tanto para la planificación anual como para los ajustes de movimiento de animales y niveles de suplementación que realizan mensualmente durante la visita del asesor (F Pacín, com pers.). La organización de los productores en grupos también fue relevante en el proceso de adopción ya que contribuyó a una comunicación más fluida entre los productores y entre los productores y asesores y nuestro equipo de investigación.

La aproximación presentada en este Capítulo intenta balancear la robustez conceptual del modelo de la EUR (Monteith 1972) con cierto grado de empirismo necesario para poder generar un seguimiento operativo de la PF a la escala temporal y espacial requerida por los productores. Esta situación involucró ciertos supuestos que podrían limitar la precisión de las estimaciones. En primero lugar, se utilizó una relación empírica entre IVN y fRFAA derivada de la literatura y parametrizada para las condiciones locales (Gallo et al. 1985, Potter et al. 1993, Sellers et al. 1996, Le Roux et al. 1997, Los et al. 2000, Piñeiro et al. 2006). Si bien la forma de esa función podría ser diferente para diferentes biomas (Myneni et al. 2002), este trabajo está restringido a pasturas cultivadas y naturalizadas, lo cual mitiga esta limitación potencial (Fensholt 2004). Evaluaciones a campo realizadas a posteriori del desarrollo del sistema de seguimiento indican que la relación IVN-fRFAA utilizada en este Capítulo es razonablemente precisa (Capítulo 3). En segundo lugar, la estimación de la EUR a partir de calibraciones empíricas entre PF estimada a campo y RFAA limita su uso a condiciones locales y a un paso temporal determinado: dado que las calibraciones fueron mensuales-bimensuales, no es posible generar, por ejemplo, estimaciones de PF diarias o semanales. En el Capítulo 4 se evalúa la conveniencia de incluir un cálculo más mecanístico de la EUR diaria. Esa aproximación, basada en la lógica general del algoritmo MOD 17 (Heinsch et al. 2003), utiliza una EUR potencial que luego es reducida por coeficientes asociados a limitaciones por agua, temperatura, y radiación incidente. En tercer lugar, en este trabajo, tanto la respiración como la productividad subterránea están integradas en las estimaciones empíricas de la EUR. Esto no sería un problema si ambas variables fueran una proporción constante de la

producción primaria neta aérea (Hanan et al. 1995, Nouvellon et al. 2000). Mientras que este supuesto es razonable para la respiración, puede no serlo para la productividad subterránea, que puede, por ejemplo, ser modificada debido al pastoreo (Oosterheld 1992). Sin embargo, estimar esta productividad subterránea variable según las condiciones de defoliación de la pastura no sería posible operativamente en el contexto del sistema de seguimiento actual.

Las cosechas de biomasa utilizadas para estimar la EUR surgen de una iniciativa de un grupo de productores con el objetivo de conocer la PF de sus recursos forrajeros, y debido a la longitud de ciertos períodos de rebrote podrían haber involucrado cierta subestimación de la PF en algunos momentos del año. Idealmente, la estimación de PF en base a cosechas de biomasa en pasturas que rebrotan luego de una defoliación debe ser realizada con intervalos entre cosecha que no superen la vida media foliar de las especies en cuestión de forma de no tener pérdidas de material (lo que llevaría en los cálculos a una subestimación de la PF real) por senescencia y caída (Lemaire y Chapman 1996, Long, 1989 #690, Lemaire y Agnusdei 2000). En este trabajo, las pérdidas por senescencia fueron controladas al considerar como PF la biomasa total presente al momento de cosecha, esto es, la biomasa verde más el material muerto en pie. Así, al incluir el material muerto en las estimaciones de PF es razonable admitir períodos de rebrote algo más extendidos que cuando se estima la PF como la acumulación de material verde (Sala y Austin 2000). Aun con la consideración del material muerto en el cálculo pueden ocurrir subestimaciones de la PF si el período se extiende en exceso debido a la pérdida de peso del material muerto en pie (por la removilización que ocurre antes de la senescencia y por la descomposición del tejido muerto en pie) y fundamentalmente por el desprendimiento y caída del material muerto, que no será cosechado. Las evaluaciones del protocolo de estimación de la PF realizadas comparando la EUR obtenida excluyendo los rebrotes de mayor duración (datos no mostrados) no indicaron que en este trabajo haya habido subestimaciones significativas de la PF por la duración de los rebrotes. De todas formas, debido a que las estimaciones de PF no se basaron en datos generados en un experimento *ad hoc*, los valores de EUR deben tomarse solo como una aproximación a los valores reales. Si bien estas estimaciones representan una potencial fuente de imprecisión en la estimación de la EUR y entonces en el sistema de seguimiento forrajero, es razonable utilizarlas debido a que existen en el sistema otras fuentes de imprecisión mayores: los píxeles para los cuales se estimó la RFAA que se compara con los datos de PF tienen un tamaño mucho mayor que las jaulas de corte y posiblemente condiciones de crecimiento (por ejemplo área foliar promedio) diferentes. Así, el sistema de seguimiento forrajero que se presenta en esta tesis debe ser visto solo como una aproximación para que los productores y asesores dispongan de una fuente de información cuantitativa superadora de la situación actual, y no como una estimación de la PF detallada como la que se obtendría, por ejemplo, en un experimento ecofisiológico.

La escala espacio-temporal de las estimaciones generadas por el sistema de seguimiento podría limitar su utilidad en algunos sistemas de producción muy intensivos. Dado que los píxeles de 6 ha de la grilla de las imágenes tienen una ubicación fija, en general un lote tiene que tener un mínimo de ~20 ha para que un píxel pueda quedar completamente incluido en él. Afortunadamente, en las condiciones de la Pampa Húmeda, solo algunos tambos tienen una proporción significativa de sus lotes bajo esta superficie límite. Hay que destacar que se hace referencia a lotes y no a franjas de pastoreo ya que desde una perspectiva de manejo lo trascendente es cuantificar la PF de todo el circuito de pastoreo, y no de una franja en particular. Por su parte, la escala

temporal podría ser limitante en sistemas donde los ajustes de manejo del pastoreo ocurren en intervalos menores a un mes. Nuevamente, este tipo de sistemas productivos es poco común fuera de los tambos altamente intensivos. Y aún en estos tambos el sistema de seguimiento puede ser útil ya que en la mayoría de esos casos los productores no cuentan con otra fuente de información de PF, y porque las estimaciones mensuales son suficientemente detalladas para analizar ciclos de producción anteriores.

El sistema plantea una serie de desafíos de investigación aún sin resolver. Entre otros, se pueden destacar los siguientes:

- Continuidad de las misiones satelitales. El sensor satelital MODIS, utilizado en este sistema, dejará de operar en los próximos 2-3 años y no está aún confirmada la fecha en la que se dispondrá de imágenes de su sucesor, VIIRS. Este nuevo sensor tendrá ciertas características distintas por lo que el sistema de seguimiento se deberá adaptar a una nueva fuente de información.
- Discriminación del componente forrajero y no forrajero del recurso. En ciertos sistemas productivos una cantidad variable de la productividad no es consumible por el ganado y entonces sería crítico para el sistema poder diferenciarla.
- Sistemas productivos con presencia de leñosas. Este es un caso extremo dentro de la problemática anterior, ya que no solo una parte de la productividad no es forrajera sino que además ese estrato leñoso interfiere en la estimación de la productividad de las herbáceas cuando se utiliza teledetección. Este importante desafío debe ser resuelto para utilizar el sistema de seguimiento en regiones con monte.
- Diseño de protocolos de muestreo a campo. La longitud de períodos de rebrote o intervalos de estimación de biomasa para el cálculo de la PF debe ser tal que minimice las posibilidades de subestimación por senescencia y caída (Long et al. 1989). Además es preferible tener estimaciones periódicas (de acumulación de biomasa e interceptación de radiación) dentro de cada período de rebrote de forma de poder calcular la EUR como la pendiente de la relación entre la biomasa y la radiación interceptada. Es fundamental tener en cuenta estos aspectos al diseñar protocolos de muestreo a campo.

La disponibilidad de sistemas de seguimiento como el que aquí se presenta tiene implicancias para la sustentabilidad de sistemas de pastizal y para la investigación en ecología y agricultura. El conocimiento espacio-temporal detallado de la PF permite a los productores ajustar la carga animal con mayor precisión, lo cual puede traducirse en un uso más eficiente del recurso y un menor riesgo de sobre pastoreo. La característica del sistema de seguimiento de generar estimaciones en tiempo casi real, y la serie histórica de diez años, permiten a los productores anticipar decisiones ante eventos extremos ya sea de baja como de alta PF. Además, la lógica del sistema basado en la EUR, con su fuerte énfasis en la fracción de radiación incidente absorbida como un determinante de la PF, concientiza a los productores y asesores sobre el valor del área foliar remanente luego del pastoreo o de sequías, con consecuencias positivas para la productividad posterior y la conservación de pastizales. El extraordinario aumento en la disponibilidad de datos de PF con resolución espacio-temporal relevante abre la oportunidad a nueva investigación sobre los controles ambientales y de manejo de la PF a nivel de grupo, campo, y lote, que pueden incluso incluir manipulaciones experimentales y evaluación a esas mismas escalas. Las perspectivas globales de los sistemas de producción ganaderos para los próximos 25 años predicen una fuerte intensificación que requerirá

mejoras de manejo (Bouwman et al. 2005). El conocimiento detallado de la PF aparece como un elemento clave en este proceso.

CAPÍTULO 3. Estimación de la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada a partir de índices de vegetación

3.1 Introducción

Los índices de vegetación (IV) derivados de información espectral provista por sensores remotos son ampliamente utilizados para caracterizar el funcionamiento de la vegetación (Huete et al. 2002, Glenn et al. 2008). Estos índices se utilizan directamente como indicadores del estado de la vegetación o como estimadores de otras variables biofísicas, como el índice de área foliar o la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (fRFAA, Gallo et al. 1985, Daughtry et al. 1992, Le Roux et al. 1997, Gower et al. 1999, Nagler et al. 2004, Xiao et al. 2004, Olofsson y Eklundh 2007). Los IV están directamente relacionados con la fRFAA porque se basan en las propiedades espectrales de la vegetación verde de absorber intensamente la radiación visible para el proceso fotosintético (especialmente en la longitud de onda del rojo), y de reflejar la mayor parte de la radiación en la zona del infrarrojo cercano (Sellers 1985, Huete et al. 2002). Este comportamiento espectral está, en parte, asociado a la clorofila, y es por ello que solo se encuentra presente en la vegetación verde y permite inferir la proporción de la radiación incidente canalizada a la fotosíntesis (Sellers 1985, Di Bella et al. 2004, Gitelson et al. 2007). Luego, el modelo de la eficiencia en el uso de la radiación (Monteith 1972) es la aproximación comúnmente utilizada para estimar la productividad primaria neta aérea de distintos tipos de vegetación utilizando la información espectral (Running et al. 2004).

En los últimos años se han propuesto distintos IV que se basan en el mismo contraste espectral e intentan “limpiar” u optimizar la respuesta respecto de distintas distorsiones posibles, como el color del suelo bajo el canopy, la presencia de aerosoles en la atmósfera, o la saturación de la respuesta espectral a altos niveles de área foliar. El más sencillo de los IV es el cociente simple (CS, Tucker 1979), que se calcula directamente como el cociente entre la radiación reflejada en la longitud de onda del infrarrojo cercano (ρ_{nir} , ~850nm) y en el rojo (ρ_{red} , ~650nm). El índice de vegetación normalizado (IVN, (nir-red) dividido por la suma de ambos, Tucker 1979) es el índice más ampliamente utilizado. El índice de vegetación ajustado por suelo (SAVI, Huete 1988) es una modificación del IVN que intenta disminuir la distorsión generada por el color de suelo que puede hacer, por ejemplo, que un mismo canopy tenga IVN diferente antes y después de una lluvia que modifica el color del suelo. El índice de rango dinámico ampliado (WDRVI, Gitelson 2004) intenta amplificar la respuesta, ensanchando el rango de valores probables de la variable respuesta y disminuyendo la saturación a altos niveles de área foliar, para poder detectar diferencias más sutiles entre canopies distintos. El índice de vegetación mejorado (IVM, Huete et al. 2002, Glenn et al. 2008, Jiang et al. 2008) incorpora en su cálculo, además del rojo y el infrarrojo cercano, información espectral en la banda del azul. Este índice intenta reducir la saturación a altos niveles de área foliar y la distorsión generada por el color del suelo y la presencia de aerosoles. Los distintos IV son en definitiva formas alternativas de aprovechar el comportamiento espectral de la vegetación y disminuir el ruido asociado a esta señal.

El sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), a bordo de las plataformas satelitales Terra y Aqua del Sistema de Observación Terrestre de la NASA

(EOS-NASA), tiene una resolución espacial de 250 m y una temporal prácticamente diaria. A partir de estas imágenes originales, la información es procesada de manera estándar y se genera información de reflectancia en compuestos de 8 y 16 días. El procesamiento utiliza una grilla fija sobre la superficie de la tierra lo cual facilita el uso de las imágenes y logra muy buena georreferenciación. Además presenta correcciones atmosféricas y detección de nubosidad notablemente mejoradas respecto de los sensores utilizados anteriormente. Estas características son requisitos básicos para poder realizar un seguimiento de la vegetación a la escala de unidad de manejo.

La fRFAA se puede estimar a partir de información espectral con modelos de complejidad variable (Sellers 1985, Potter et al. 1993, Gower et al. 1999, Huete et al. 2002, Myneni et al. 2002, Glenn et al. 2008). Los modelos más complejos consideran en detalle las interacciones entre la radiación incidente, las hojas individuales, y el canopy como un todo, y frecuentemente requieren una cantidad de información adicional que es a su vez generada por otros modelos de transferencia radiativa (Myneni et al. 2002, Fensholt et al. 2004). Los modelos más sencillos se basan en la relación directa que existe entre los IV y la fRFAA. La forma (lineal o curvilínea) y la parametrización (IV a fRFAA=0, IV a fRFAA 95%) de la función utilizada para relacionar la fRFAA con los IV depende del IV y el sensor utilizado, la influencia de la atmósfera, el color del suelo, y el tipo de vegetación (Gallo et al. 1985, Sellers 1985, Potter et al. 1993, Le Roux et al. 1997, Los et al. 2000, Piñeiro et al. 2006). Es por ello que estas funciones necesitan ser parametrizadas y validadas cada vez que se las quiere utilizar en nuevas condiciones. Las funciones lineales son preferibles respecto de las curvilíneas por su simplicidad, precisión y menor probabilidad de saturación (Huete et al. 2002). El rango dinámico de variación de un IV, que es la diferencia entre los valores máximos y mínimos de una serie temporal determinada, es una característica que diferencia la sensibilidad de IV generados con la misma información de reflectancia, es decir su capacidad de diferenciar estados del canopy (Gitelson 2004, Gitelson et al. 2007). El rango dinámico depende del algoritmo de cálculo del IV pero también de las correcciones atmosféricas y la resolución espacial, por lo cual es una propiedad no solo del IV sino también del sensor y el procesamiento de las imágenes. Los modelos más complejos de estimación de fRFAA no han demostrado una buena relación complejidad/precisión (Glenn et al. 2008) y posiblemente por ello se siguen utilizando muy frecuentemente modelos empíricos sencillos.

La evaluación a campo de los modelos de estimación de fRFAA a partir de IV es compleja porque hay que comparar mediciones realizadas a escalas espaciales distintas (Turner et al. 2005, Cheng et al. 2006, Jiang et al. 2006, Olofsson y Eklundh 2007, Wardlow et al. 2007, Glenn et al. 2008, Miura et al. 2008). Para poder conciliar escalas, por ejemplo, para comparar los datos tomados por un sensor con tamaño de píxel de 6 ha con las mediciones puntuales tomadas en el campo, es necesario trabajar en un área de cierta superficie mínima (Turner et al. 2005). Además la heterogeneidad de la vegetación en el sitio de interés determina la intensidad de muestreo necesaria para lograr representatividad en las mediciones en tierra de toda la superficie que el sensor evalúa. Frecuentemente esta representatividad es difícil de lograr en sistemas heterogéneos. Turner et al. (2005) utilizaron una escala intermedia (imagen Landsat) para conciliar dos escalas distintas: píxeles MODIS de 1km de lado y el área de influencia de estaciones de muestreo puntuales a campo. En este caso, la imagen Landsat guió el proceso de muestreo a campo porque permitió conocer la proporción de distintos tipos de vegetación dentro del píxel de 1km. Las metodologías de calibración y validación en tierra de estimaciones basadas en imágenes satelitales deben considerar cómo conciliar las distintas escalas y muestrear adecuadamente las áreas de interés.

Las pasturas en condiciones de producción presentan desafíos particulares para poder realizar trabajos de validación de relativamente bajo costo y esfuerzo de muestreo. Entre las cuestiones a considerar se encuentra la heterogeneidad espacial impuesta por el pastoreo, la elevada (y variable) cantidad de material muerto en pie, y la dificultad de poder medir un mismo lote en condiciones contrastantes de área foliar, desde muy baja hasta valores elevados que tengan fRFAA cercana a 100%. El cultivo de trigo tiene una estructura que en la mayor parte del ciclo es razonablemente similar a la de una pastura de gramínea cultivada (espaciamiento entre surcos, estructura de las plantas), y hasta pasada la floración el canopeo no presenta material muerto que pueda interferir en la fRFAA por los tejidos verdes, fotosintéticos. Además, por los tipos de suelos donde generalmente se lo cultiva en la Provincia de Buenos Aires, y por la ausencia de pastoreo, desarrolla un canopeo muy homogéneo espacialmente. Por ello el cultivo de trigo constituye una solución de compromiso adecuada para obtener mediciones detalladas y representativas a campo de la fRFAA de un área que pueda ser comparada con imágenes satelitales de resolución espacial intermedia.

Actualmente existen varias fuentes de información de fRFAA derivada de imágenes satelitales (Weiss et al. 2007). Sin embargo, las evaluaciones a campo de estas alternativas son escasas fundamentalmente por la dificultad de conciliar escalas contrastantes y muestrear de forma representativa áreas extensas de vegetación heterogénea (Turner et al. 2005). El objetivo de este capítulo es:

- *Identificar la metodología más apropiada para estimar fRFAA a partir de IV.* La hipótesis asociada a este objetivo establece que la saturación de los IV más simples a altos niveles de área foliar y la variabilidad de color de suelo, debida a tipos y humedades de suelos contrastantes, dificulta la estimación de fRFAA a partir de información espectral. Una predicción que se desprende de esta hipótesis es que el IVM reflejará las variaciones de fRFAA más ajustadamente que el IVN.

3.2 Metodología

3.2.1 Descripción del sitio y selección de lotes

El trabajo se realizó en los partidos de Azul y Laprida, en el centro de la provincia de Buenos Aires, en los ciclos agrícolas 2005-2006 y 2006-2007. El clima es templado sub-húmedo. La precipitación media anual se ubica entre 900 y 1000mm, y se distribuye homogéneamente durante el período primavera-verano-otoño, mientras que en los meses de invierno llueve menos que en los meses del resto del año. La temperatura media mensual varía desde 7°C en julio hasta 22°C en enero. Entre abril y octubre ocurren alrededor de 76 heladas agronómicas (intemperie a 5 cm del suelo) cada año. Los suelos agrícolas son en general fértiles, del Orden Molisol, con presencia de una capa de carbonato de calcio subsuperficial (tosca) a profundidades variables desde 20 cm hasta más de 1 m.

Los muestreos se realizaron en 13 lotes de producción comercial de trigo de 4 campos sometidos al manejo típico de los productores de la zona. En todos los casos el espaciado entre surcos fue de 19.5 cm. Se trabajó en lotes sembrados con distintas variedades, fechas de siembra, densidades, tipo de labranza, fertilización. De esta forma se pretendió incluir la heterogeneidad que todas estas variables de manejo incorporan a

los lotes y que repercute, posiblemente, en su balance radiativo. Los lotes incluían completamente al menos un píxel de la grilla de las imágenes MODIS (Fig. 3.1).

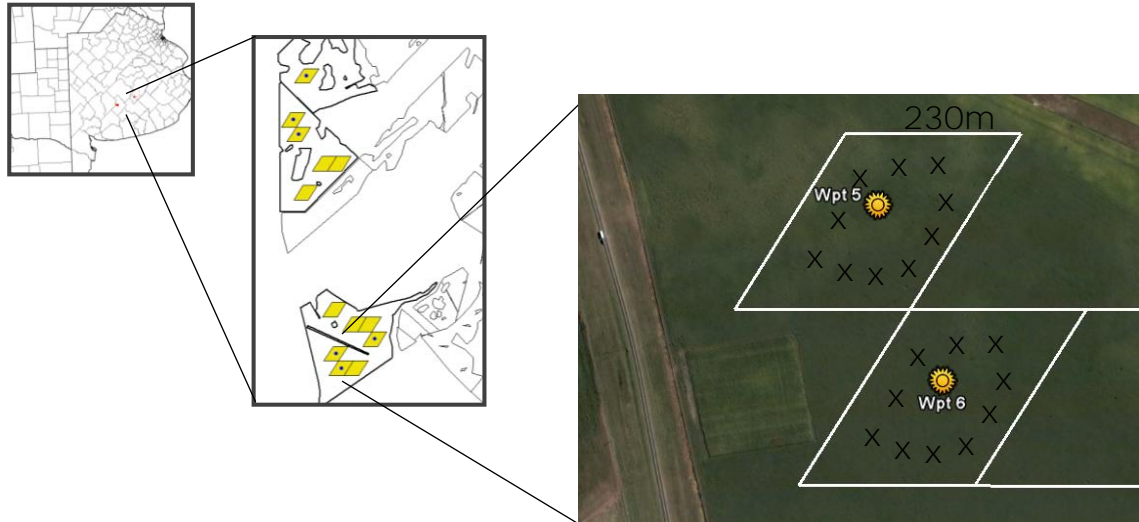


Figura 3.1. Ejemplo de lotes de trigo en la campaña 2004-2005. Cada lote incluye una cantidad variable de píxeles de las imágenes satelitales MODIS. Dentro de cada píxel se puede ver su centro y una ubicación posible de las 10 estaciones de muestreo a campo que lo representan. La imagen de esta figura corresponde a una vista utilizando el programa *Google Earth*.

3.2.2 Mediciones a campo

A lo largo de 8 fechas (6 en el ciclo agrícola 2005 y 2 en el 2006) se muestrearon 20 píxeles distintos. Varios de los píxeles se muestrearon en más de una fecha, pero en cada fecha se muestreaban solo algunos píxeles, lo cual resultó en un total de 41 estimaciones de fRFAA. Antes de salir al campo, se cargaba en un GPS el centroide de cada píxel a muestrear. Luego en el campo se llegaba al punto y desde ahí se realizaba el muestreo del píxel en 10 estaciones a su alrededor, a una distancia de aproximadamente 70 m (Fig. 3.1). Las mediciones se realizaron siempre dentro de un período de tres horas centrado en el mediodía solar.

En cada estación de muestreo se midió la radiación fotosintéticamente activa incidente a distintas alturas del canopeo con una barra integradora de la densidad del flujo de fotones fotosintéticos de 100 cm de longitud (*Cavadevices*). La barra se ubicó siempre en sentido diagonal a los surcos del cultivo, de forma de abarcar cuatro surcos de ancho. Se realizaron tres lecturas por estación con la barra hacia arriba: (lectura 1) bajo el canopeo, (lectura 2) sobre el canopeo y (lectura 3) nuevamente bajo el canopeo. De esta forma se obtuvieron dos lecturas representativas del valor más variable: bajo el canopeo. Luego se calculó la fRFAA como: $fRFAA = \text{Promedio (lectura 1, lectura 3)} / \text{lectura 2} * 100$. Esta forma de estimar la fRFAA es una simplificación habitualmente utilizada que captura los principales componentes del flujo de radiación con mediciones simples, y que no contempla la pérdida de radiación reflejada (albedo) ni la absorción de radiación reflejada por el suelo (Russell et al. 1989). Entre el 80 y el 90% de la radiación interceptada es efectivamente absorbida por el canopeo, lo cual llevaría a una sobreestimación de la fRFAA con la metodología utilizada en la tesis. Sin embargo se consideró que esa posible

sobreestimación está compensada con el hecho de que las mediciones puntuales de radiación interceptada realizadas alrededor del medio día subestiman en aproximadamente un 10% la interceptación de radiación integrada a lo largo del día (Sinclair y Muchow 1999). En el contexto de esta tesis se utilizan indistintamente los términos radiación interceptada y radiación absorbida, aunque no son estrictamente sinónimos.

En dos de las ocho visitas a campo se midió la reflectancia con un espectroradiómetro (FieldSpec Pro FR; Analytical Spectral Devices [ASD], Boulder, CO, USA) que mide en el rango de 350-2500 nm, a intervalos de 1.4 nm. Se utilizó un panel “blanco” de referencia (spectralon, Labsphere, Sutton, NH, USA) para estandarizar luego los valores observados. Las lecturas fueron tomadas en las mismas estaciones de muestreo donde se medía la radiación incidente con la barra de interceptación, también alrededor del medio día solar. Luego con esa información se reconstruyeron las bandas de reflectancia del sensor MODIS para realizar comparaciones específicas entre los datos tomados por el satélite y a campo en las mismas longitudes de onda como una evaluación de las correcciones atmosféricas que se aplican a las imágenes satelitales.

3.2.3 Imágenes satelitales

Para obtener datos de reflectancia de cada píxel y calcular los índices de vegetación se utilizaron imágenes MODIS. El proyecto MODIS genera una gran variedad de productos georreferenciados y con correcciones atmosféricas con los datos que toma el sensor (<http://lpdaac.usgs.gov/main.asp>). En la medida en que se mejoran los algoritmos de cálculo y corrección y se identifican errores se van presentando nuevas versiones. En este trabajo se utilizó la versión 4 (*Collection 4*) que era la última versión disponible de las imágenes. Los productos MODIS difieren por la variable que contienen (reflectancia, índices de vegetación, índice de área foliar, etc), la resolución espacial y la resolución temporal. Entre las cuatro resoluciones espaciales diferentes que existen se utilizó la más detallada: tamaño de píxel de 250 m (~6ha). Las resoluciones temporales son tres: compuestos de 8 días, compuestos de 16 días, y compuestos mensuales. Los compuestos son generados con un algoritmo automatizado que busca la mejor imagen del período considerando la nubosidad, presencia de aerosoles y el ángulo de inclinación del sensor respecto de la superficie. Se utilizaron las dos escalas temporales más detalladas para comparar su precisión.

3.2.4 Procesamiento y Análisis

Se extrajeron los datos de las imágenes para los píxeles en cuestión considerando los criterios de calidad de información disponibles en el proyecto MODIS. Luego se realizaron interpolaciones con los valores de las dos imágenes más cercanas a cada fecha de muestreo y se calculó el valor correspondiente al día particular del muestreo según su ubicación en esa serie temporal de 8 o 16 días.

Con los valores de reflectancia de las imágenes satelitales se calcularon cinco índices de vegetación utilizados en la bibliografía (Tabla 3.1). Luego se plantearon las relaciones entre los distintos índices de vegetación y la fRFAA medida a campo. Mediante análisis de regresión se buscó el mejor modelo para cada índice evaluando el coeficiente de determinación simple (R^2). En los casos en que los datos mostraron un patrón bilineal se buscó el punto de corte (valor de la variable X que separa ambas funciones lineales) que maximizara el R^2 global del modelo bilineal, utilizando el software *GraphPad Prism*.

La regresión fRFAA-IVN se comparó visualmente con la función derivada de la literatura y utilizada en el Capítulo 2 para derivar la fRFAA.

Índices de vegetación	Fórmula de cálculo	Referencia
CS	$CS = \frac{\rho_{nir}}{\rho_{pred}}$	(Tucker 1979)
IVN	$IVN = \frac{(\rho_{nir} - \rho_{pred})}{(\rho_{nir} + \rho_{pred})}$	(Tucker 1979)
IVM	$IVM = G \frac{(\rho_{nir} - \rho_{pred})}{(\rho_{nir} + C1 * \rho_{pred} - C2 * \rho_{blue} + L)}$	(Huete et al. 2002)
SAVI _{L=1}	$SAVI = (1 + L) * \frac{(\rho_{nir} - \rho_{pred})}{(\rho_{nir} + \rho_{pred} + L)}$	(Huete 1988)
SAVI _{L=0.05}	$SAVI = (1 + L) * \frac{(\rho_{nir} - \rho_{pred})}{(\rho_{nir} + \rho_{pred} + L)}$	(Huete 1988)
WDRVI	$WDRVI = \frac{(0.15 * \rho_{nir} - \rho_{pred})}{(0.15 * \rho_{nir} + \rho_{pred})}$	(Gitelson 2004)

Tabla 3.1. Fórmulas de cálculo de los distintos índices de vegetación. ρ_{pred} : reflectancia en la longitud de onda del rojo, 620-670 nm; ρ_{nir} : reflectancia en la longitud de onda del infrarrojo cercano, 841-876 nm, ρ_{blue} : reflectancia en la longitud de onda del azul, 459-479 nm. Los parámetros del IVM son G (*gain factor*)=2.5, C1 y C2 son correcciones de aerosoles (C1=6 y C2=7.5). L es el ajuste por el color bajo el canopy (*canopy background adjustment*, L=1). Para el SAVI_{L=1} L=1, y para el SAVI_{L=0.05} L=0.05.

3.3 Resultados

La combinación de muestreos en distintos lotes, estados fenológicos, y campañas agrícolas permitió explorar prácticamente todo el rango posible de valores de fRFAA, desde ausencia de material vegetal verde (fRFAA=0) hasta máxima interceptación (fRFAA~0.95; Tabla 3.2). El coeficiente de variación de de la fRFAA dentro de un píxel varió entre 2.1% y 51.1%.

Localidad	Lat	Lon	Fecha	fRFA	N	CV
Laprida	-37.484	-60.843	20-Oct-05	45%	10	45.7%
			7-Nov-05	43%	10	32.6%
	-37.482	-60.844	5-Oct-05	49%	8	21.5%
			20-Oct-05	56%	10	26.2%
			7-Nov-05	54%	10	25.7%
	-37.476	-60.781	5-Oct-05	55%	4	19.5%
			20-Oct-05	72%	8	17.6%
			7-Nov-05	78%	10	11.2%
	-37.476	-60.776	5-Oct-05	40%	5	31.6%
			20-Oct-05	76%	8	10.4%
			7-Nov-05	71%	10	21.9%
	-37.493	-60.787	20-Oct-05	90%	8	8.9%
	-37.495	-60.786	20-Oct-05	93%	10	5.9%
			7-Nov-05	93%	11	2.6%
	-37.503	-60.796	21-Oct-05	0%	#N/A	#N/A
	-37.253	-60.824	21-Oct-05	0%	#N/A	#N/A
	-37.259	-60.836	21-Oct-05	0%	#N/A	#N/A
Azul	-36.876	-59.915	21-Oct-05	84%	8	2.4%
			8-Nov-05	76%	10	6.6%
			7-Dec-05	80%	10	5.7%
	-37.172	-59.914	21-Oct-05	78%	10	12.9%
			8-Nov-05	89%	9	3.6%
			7-Dec-05	88%	8	2.2%
	-37.151	-59.908	21-Oct-05	89%	8	6.8%
			8-Nov-05	95%	9	2.4%
			7-Dec-05	93%	8	2.1%
	-37.145	-59.947	8-Nov-05	63%	8	17.5%
	-37.147	-59.951	21-Oct-05	80%	8	9.0%
			8-Nov-05	87%	8	4.2%
			7-Dec-05	86%	9	5.8%
	-37.166	-59.945	1-Aug-06	12%	10	31.7%
			6-Sep-06	32%	10	35.2%
	-37.164	-59.938	1-Aug-06	8%	10	45.8%
			6-Sep-06	22%	10	55.1%
	-37.168	-59.944	6-Sep-06	39%	10	22.3%
	-37.134	-59.952	1-Aug-06	11%	10	48.3%
			6-Sep-06	41%	10	12.7%
	-37.132	-59.953	1-Aug-06	14%	14	42.4%
			6-Sep-06	39%	10	15.3%
	-37.126	-59.950	1-Aug-06	9%	11	43.8%
			6-Sep-06	52%	10	9.2%

Tabla 3.2. Ubicación, fecha, valor promedio, número de submuestras (N) y coeficiente de variación de las estimaciones de fRFAA realizadas con la barra de interceptación de radiación en cada estación de muestreo definida por un píxel MODIS de 5.3 ha.

Las variaciones de fRFAA medida a campo estuvieron asociadas a las variaciones del índice de vegetación CS y a la reflectancia en las bandas espectrales que lo componen (Fig. 3.2). La fRFAA aumentó linealmente con el CS hasta alcanzar un *plateau* en valores cercanos a 95% de fRFAA (Fig. 3.2a). El modelo representado por la línea delgada en la Fig. 3.2a es el utilizado en el Capítulo 2 para generar las estimaciones de

fRFAA a partir del IVN. Ese modelo, obtenido de la literatura y parametrizado de forma sencilla con mínimos y máximos de lotes agrícolas de la región, ajustó bien a los datos en la parte lineal, pero el *plateau* fue ligeramente más alto que el del modelo que minimizó la suma de cuadrados para los datos tomados a campo. Las longitudes de onda que componen el CS explicaron una parte similar entre sí –y menor que el CS- de la variación de fRFAA medida a campo. La reflectancia en la longitud de onda del rojo, denominador del CS, varió entre 2.2 y 11.3%, y mostró una relación negativa con fRFAA. Por su parte, la reflectancia en la longitud de onda del infrarrojo cercano, numerador del CS, varió entre 14 y 48.2%, y mostró una relación positiva con fRFAA (Fig. 3.2b y c).

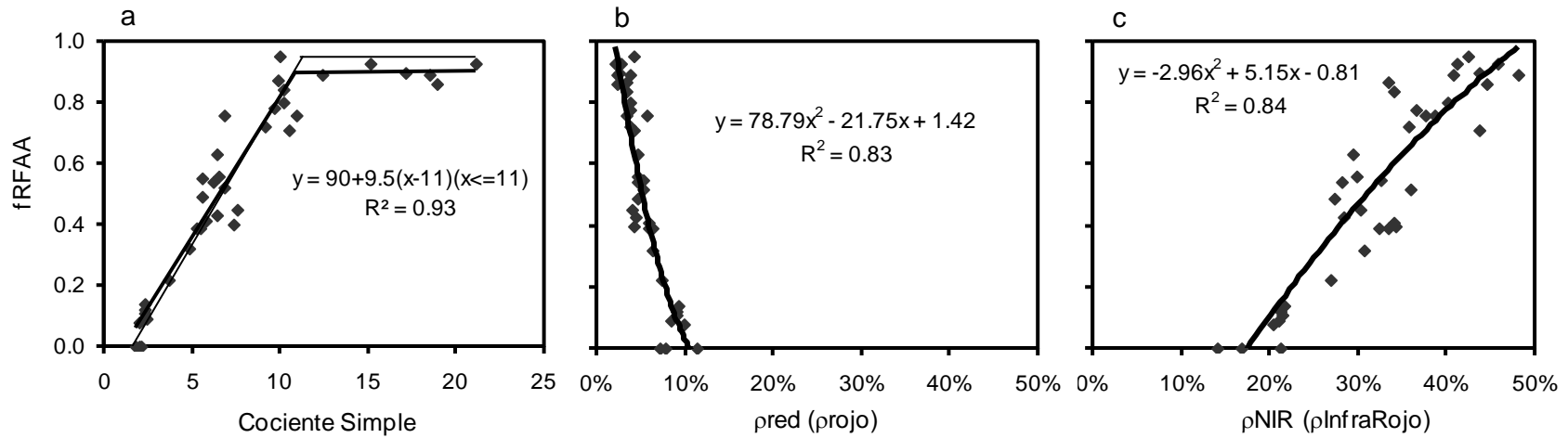


Figura 3.2. fRFAA estimada a campo para cada píxel en función del índice de vegetación cociente simple (CS) (a), y de la reflexión en la región electromagnética del rojo (pred) (b) y el infrarrojo cercano (ρ_{NIR}) (c). Los datos de reflexión provienen de observaciones del sensor espectral MODIS para cada píxel en una fecha ubicada dentro de un período de 16 días alrededor de la fecha de muestreo a campo. Las líneas gruesas representan la función de mejor ajuste entre ambas variables. En (a) la línea delgada representa el modelo de fRFAA en función de CS utilizado en el Capítulo 2.

Los índices de vegetación IVN e IVM, que son los calculados en el procesamiento estándar de los productos MODIS, también explicaron una elevada proporción de las variaciones de fRFAA (Fig. 3.3). La relación curvilínea entre fRFAA e IVN indica una saturación parcial del IVN a valores de fRFAA entre 0.5 y 0.9: en ese rango, grandes variaciones de fRFAA estuvieron asociadas a pequeños cambios de IVN. Luego, al igual que para CS, se alcanzó un *plateau* en valores de fRFAA cercanos al 95% (Fig. 3.3a). La relación curvilínea encontrada entre fRFAA e IVN puede también advertirse a partir de los datos de la Fig. 3.2 y considerando que el CS y el IVN presentan entre sí una relación matemática curvilínea. Al igual que para el CS, el modelo utilizado en el Capítulo 2 también ajustó bien a los datos pero con un *plateau* más alto que el modelo con mejor ajuste para los datos tomados a campo. A diferencia del IVN, la relación entre fRFAA e IVM fue lineal en todo su rango, lo cual indica una mayor proporcionalidad en la variación de ambas variables (Fig. 3.3b). La amplitud del rango dinámico de variación (diferencia entre el máximo y mínimo valor observado para cada índice de vegetación) fue muy similar para ambos índices de vegetación: 0.62 para el IVN y 0.63 para el IVM.

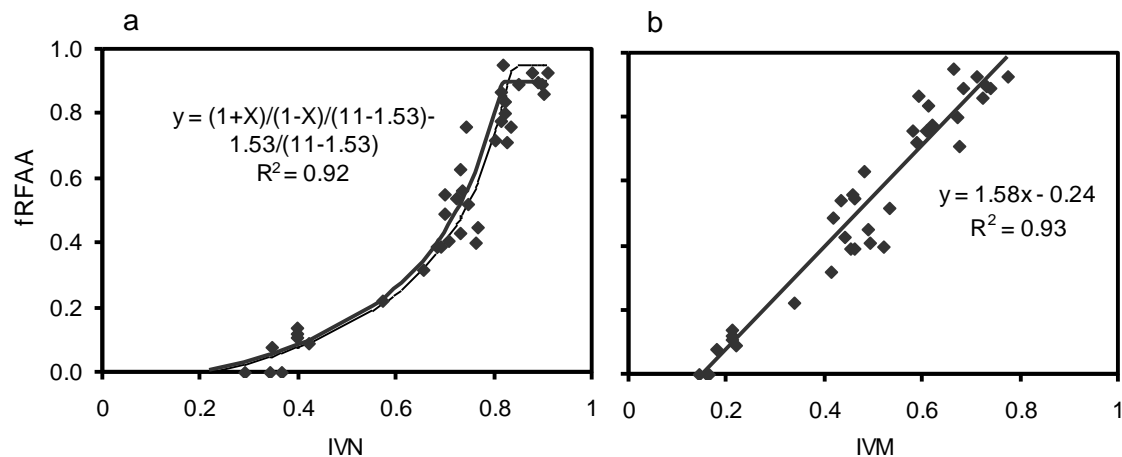


Figura 3.3. fRFAA estimada a campo para cada píxel en función de (a) el índice de vegetación normalizado (IVN), y (b) el índice de vegetación mejorado (IVM). Los datos de IVN e IVM son calculados en forma estándar en la sección Procesamiento del proyecto MODIS y forman parte del producto MOD13Q1, que tiene una resolución temporal de 16 días. Las líneas gruesas representan la función de mejor ajuste entre ambas variables. En (a) la línea delgada representa el modelo utilizado en el Capítulo 2 para estimar fRFAA a partir del IVN.

En canopeos con cantidades variables de hojas y tallos muertos (etapas avanzadas del cultivo de trigo, hacia fines del período de llenado de granos), cuando no se remueve el material muerto antes de la medición, la fRFAA medida con la barra incluye la interceptación por partes secas del canopeo. En las observaciones generadas en estas condiciones, la interceptación de radiación se mantuvo elevada, mientras que los índices de vegetación se redujeron marcadamente (Fig. 3.4a y b). Así, se pone de manifiesto cómo la presencia de material muerto afecta las mediciones con la barra de interceptación de radiación, mientras que no afecta las determinaciones con sensores espectrales, tal como es esperable teóricamente (Di Bella et al. 2004).

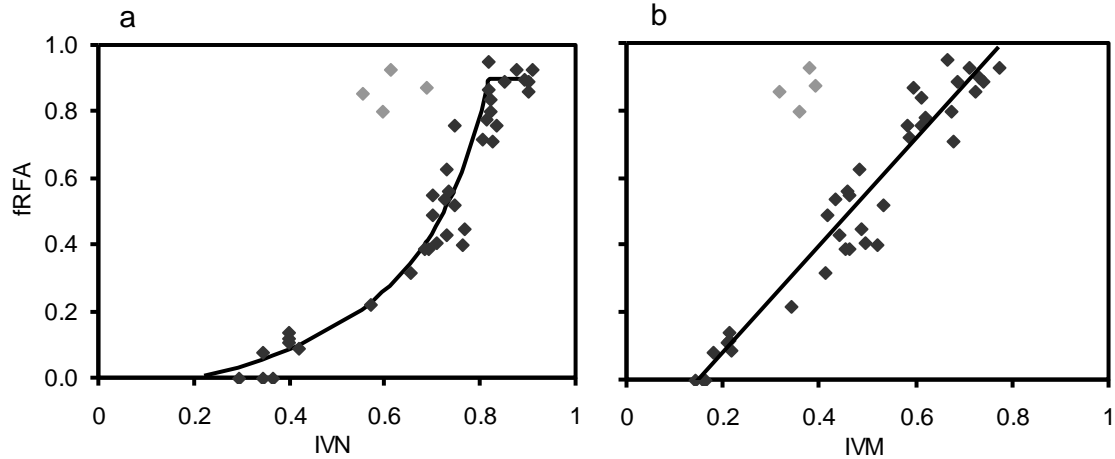


Figura 3.4. fRFAA estimada a campo para cada píxel en función del índice de vegetación normalizado (IVN) (a), y del índice de vegetación mejorado (IVM) (b). Los puntos en gris provienen de cultivos con presencia de cantidades variables de hojas y tallos muertos. Las líneas gruesas representan la función de mejor ajuste entre las variables sin incluir los puntos grises.

Los índices de vegetación SAVI y WDRVI, que no son calculados en el procesamiento estándar de los productos MODIS, también explicaron una elevada proporción de las variaciones de fRFAA (Fig. 3.5). La relación entre SAVI y fRFAA fue distinta para las distintas formulaciones del índice: lineal para SAVI con factor de corrección (L) 1 y curvilínea para SAVI con $L=0.05$ (Fig. 3.5a y b). Por su parte, la relación entre fRFAA y WDRVI fue bilineal (Fig. 3.5c). Entre los IV normalizados, el WDRVI fue el índice con la máxima amplitud del rango dinámico de variación: 1.09, comparado con 0.62, 0.63, 0.47, y 0.60, para IVN, IVM, SAVI_1, y SAVI_0.05, respectivamente.

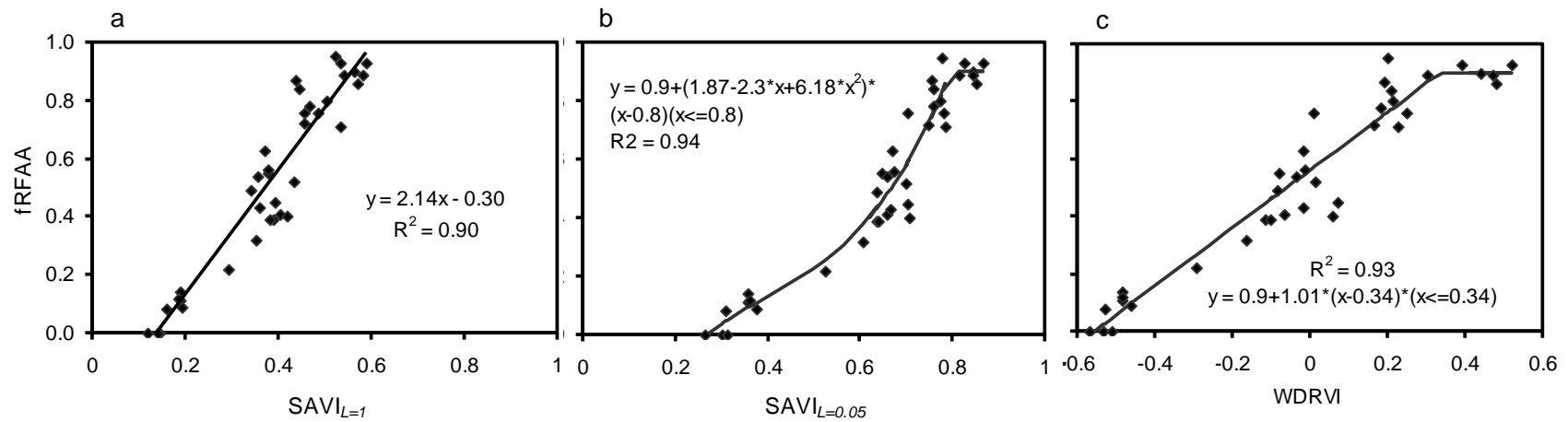


Figura 3.5. fRFAA estimada a campo para cada píxel en función de los índices de vegetación (a) SAVI₁ (*soil adjusted vegetation index*, formulado con factor de corrección 1), (b) SAVI_{0.05} (formulado con factor de corrección 0.05), y (c) WDRVI (*wide dynamic range vegetation index*). Las líneas gruesas representan la función de mejor ajuste entre las variables.

Los distintos esquemas de procesamiento temporal del proyecto MODIS generaron distintas relaciones con la fRFAA medida a campo (Fig. 3.6). Los compuestos de 16 días presentaron una relación curvilínea, y los compuestos de 8 días tuvieron un comportamiento más lineal. El ajuste de la relación para los compuestos de 8 días fue levemente menor que para los compuestos de 16 días ($R^2=0.88$ vs. $R^2=0.92$).

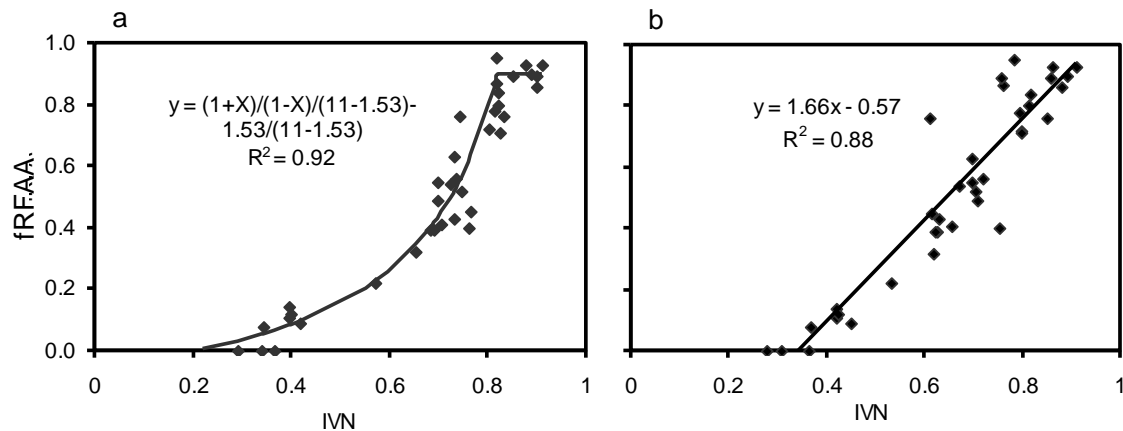


Figura 3.6. fRFAA estimada a campo para cada píxel en función del índice de vegetación normalizado (IVN) proveniente de compuestos de 16 (a) y 8 (b) días. Las líneas gruesas representan la función de mejor ajuste entre ambas variables.

Hubo consistencia entre la información espectral del sensor MODIS y la tomada a campo con el sensor hiperespectral (Fig. 3.7). Sin embargo las escalas de variación fueron distintas, como lo muestra el apartamiento entre la recta de ajuste y la recta 1:1 de la Fig. 3.7a. Asociado a ello, el rango dinámico de variación de los 4 píxeles incluidos en la comparación fue mayor para el sensor hiperespectral que para MODIS (0.19 vs. 0.09). Esta relación entre los datos provenientes de ambos sensores fue generada principalmente por el patrón de reflexión en la longitud de onda del rojo, que tuvo un comportamiento más distinto entre sensores que la reflexión en el infrarrojo cercano (Fig. 3.7b y c).

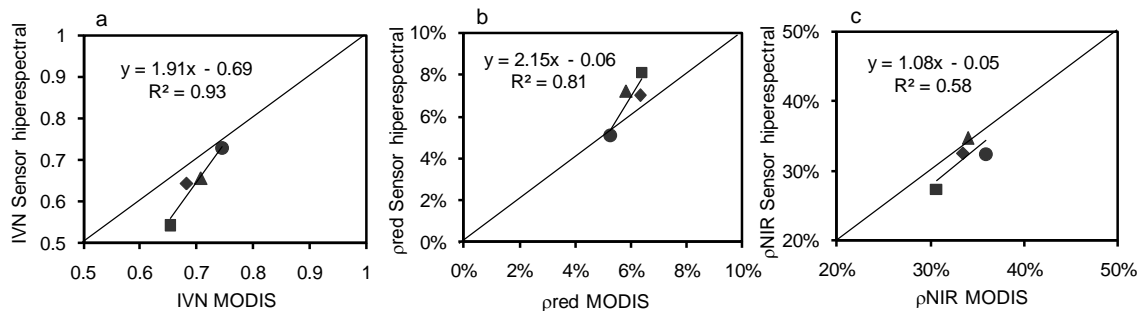


Figura 3.7. Relación entre las mediciones a campo del sensor hiperespectral y el sensor MODIS para el índice de vegetación normalizado (IVN, a), la reflexión en la longitud de onda del rojo (b) y del infrarrojo cercano (c). Las líneas representan la relación de mejor ajuste y la recta 1:1. Cada símbolo representa el mismo píxel particular en las tres figuras.

3.4 Discusión

En este capítulo las variaciones observadas de los índices de vegetación calculados a partir de información espectral del sensor MODIS explicaron entre el 90 y 94% de las variaciones de fRFAA medida a campo en forma directa con una barra de interceptación en cultivos de trigo. El IVM presentó una relación más lineal que el IVN, posiblemente asociado a la ausencia de saturación del IVM ante aumentos del área foliar, tal como ha sido observado en trabajos previos (Le Roux et al. 1997, Fensholt 2004, Xiao et al. 2005, Jiang et al. 2008). Las imágenes satelitales provenientes de compuestos temporales más cortos (8 vs. 16 días) no mostraron una mejora en la precisión de las estimaciones de fRFAA. La comparación de información proveniente de escalas contrastantes se basó en la planificación del trabajo de campo en función de la resolución espacio-temporal del sensor y de la fenología del cultivo.

El IVM mostró una relación más lineal que el IVN con la fRFAA (Fig. 3.3). Este comportamiento está de acuerdo con las características descritas para el IVM de mayor sensibilidad en situaciones de alta área foliar (Huete et al. 2002, Huete et al. 2006, Glenn et al. 2008, Jiang et al. 2008) y mayor linealidad ante cambios en la proporción de suelo desnudo/cubierto (Jiang et al. 2006). La relación curvilínea entre fRFAA e IVN implicaría una relación aún más curvilínea entre fRFAA y el índice de área foliar (no medido en este trabajo), debido a la relación entre estas dos variables caracterizada por el coeficiente de extinción lumínica, que es la relación a la que se hace referencia en general en la bibliografía (Le Roux et al. 1997, Huete et al. 2002, Huete et al. 2006, Jiang et al. 2008). La función lineal simple del IVM es preferible para estimar fRFAA a partir de información espectral porque las variaciones del IVM se traducen en variaciones proporcionales de fRFAA en todo el rango de valores posibles, mientras que pequeñas variaciones del IVN, por ejemplo, en el rango 0.7-0.8 se traducen en variaciones más que proporcionales de fRFAA (Fig. 3.3). Así, pequeñas variaciones del IVN en un rango de valores muy frecuente en pasturas y pastizales, que pueden ser consecuencia de la imprecisión propia del sensor o de los algoritmos de georreferenciación y corrección (Tan et al. 2006), se traducen en grandes cambios de fRFAA, disminuyendo potencialmente la precisión de su estimación. El ajuste fue similar (IVN $R^2=0.92$, IVM $R^2=0.93$) lo cual indica que la supuesta reducción del ruido en el IVM esperado por el tratamiento de los aerosoles y la reducción de la influencia del color del suelo (Huete et al. 2002, Jiang et al. 2008) no representó una ventaja muy significativa. Posiblemente esto fue consecuencia de buenas condiciones atmosféricas en los compuestos de imágenes utilizados y una distribución espacial restringida al centro de la Provincia de Buenos Aires que no incluyó suelos de colores contrastantes. Así estas ventajas del IVM pudieron no haberse expresado.

Los únicos cuatro píxeles muestreados con presencia de material muerto en pie mostraron un comportamiento claramente distinto al resto. Tuvieron alta interceptación de radiación (medida a campo con la barra) pero una marcada reducción en ambos IV respecto del resto de los píxeles con fRFAA similar, pero sin presencia de material muerto (Fig. 3.4 a y b). Este corrimiento de los datos con material muerto fuera de la función es consecuencia de que la medición con la barra de interceptación incluye en su estimación la interceptación de radiación por parte de los componentes muertos del canopy, mientras que los índices espectrales son sensibles solo a los componentes verdes – fotosintéticos- del canopy. Más aún, el aumento de material muerto no solo reduce el valor de los IV por implicar menor presencia de material verde, sino porque además ese material muerto suele interferir en la interceptación de radiación del material verde remanente (Di Bella et al. 2004). Esta característica de las estimaciones espectrales, que

es una de sus ventajas más relevantes, plantea el interrogante sobre si las estimaciones con barras de interceptación deben o no ser consideradas el método “de referencia”. Corregir las lecturas de interceptación de radiación (realizadas con la barra) con el % de material muerto no resultaría correcto principalmente porque el material muerto no presenta una distribución vertical homogénea dentro del canopeo. Por lo tanto, su participación en la interceptación de radiación no es proporcional a su peso. Pero, además, la sensibilidad de las determinaciones espectrales, al menos en términos teóricos, va mucho más allá de la discriminación entre verde y muerto: los niveles de absorción de radiación en distintas longitudes de onda dependen del contenido de clorofila de las hojas, y es por ello que los IV son sensibles al avance de la senescencia del cultivo aún en estadios en que una clasificación dicotómica clasificaría al cultivo como “verde” (Myneni et al. 2002, Fensholt et al. 2004). Así, en cultivos que avanzan hacia la madurez fisiológica, pasada la floración, las hojas van envejeciendo y perdiendo su verdor original y, por lo tanto, determinaciones de fRFAA con la barra arrojarían altos niveles de interceptación mientras que mediciones espectrales comenzarían antes a detectar la reducción de interceptación y entonces de actividad fotosintética. Por todo esto, además, haber sacado manualmente el material muerto del canopeo antes de medir con la barra, una práctica común en estas mediciones en cultivos, habría mejorado solo parcialmente el ajuste de los puntos a la recta de regresión.

Los IV SAVI, con ambas versiones de su parámetro L, y WDRVI, calculados a partir de la misma información de reflectancia que el IVN y el IVM, también explicaron gran parte de las variaciones de fRFAA medida a campo (Fig. 3.5 a, b y c). A partir de las dos versiones utilizadas del SAVI, con $L=1$ y $L=0.05$, puede observarse que L influye sobre la linealidad de la relación entre fRFAA y el IV. El $SAVI_{L=0.05}$ es una versión muy similar al IVN, ya que la única diferencia entre la ecuación del IVN y el SAVI es justamente la introducción del parámetro L, y cuando este toma valores cercanos a cero la fórmula del SAVI tiende a la fórmula del IVN (Tabla 3.1). En este trabajo, cuando L tomó valores mayores, la relación fRFAA-SAVI se diferenció de la de fRFAA-IVN y se hizo más lineal. Posiblemente índices como el SAVI y el IVM, que reducen el ruido asociado a diferencias en el color del suelo, evidencien una mejoría significativa respecto de índices como el IVN en comparaciones que incluyan una mayor variación de tipos de suelo que los considerados en este trabajo (por ejemplo, trabajos que comparen cultivos en distintas regiones o distintos tipos de vegetación a escala global, Huete 1988, Huete et al. 2002, Jiang et al. 2008). El WDRVI efectivamente mostró un mayor rango dinámico de variación: los valores oscilaron entre -0.55 y 0.55, es decir una amplitud de 1.1 (Fig. 3.5 c), casi el doble de la amplitud del IVM. Además también mostró una relación más lineal con la fRFAA, ya que redujo la saturación observada con el IVN. El WDRVI no ha sido aún extensivamente evaluado ni utilizado, y si bien aquí mostró una relación lineal con la fRFAA no tiene en su formulación un objetivo específico de reducir las variaciones asociadas a distintos tipos de suelos (Gitelson 2004, Jiang et al. 2008).

La relación entre fRFAA e IVN generada a partir del IVN calculado con las imágenes MODIS provenientes de compuestos temporales de 8 días de duración tuvo menor ajuste que la proveniente de compuestos de 16 días. A priori sería esperable que los compuestos de 8 días sean más precisos, ya que es más probable que en ellos la fecha de la observación efectiva (imagen del período seleccionada como representativa del compuesto) sea más cercana a la fecha de la medición a campo. Sin embargo, los compuestos de menor duración tienen mayor probabilidad de incluir datos de menor calidad debida a nubosidad o distorsiones geométricas por haber utilizado observaciones con ángulos de inclinación del sensor más amplios que en los compuestos de 16 días, en

los que la fuente de información primaria sobre la que se realiza la selección es el doble de extensa (Huete et al. 2002, Tan et al. 2006). Así, existe una relación de compromiso entre compuestos de mayor duración que garanticen la selección de observaciones de alta calidad y compuestos de menor duración que permitan un seguimiento temporal más preciso de la dinámica de la vegetación (Didan y Huete 2006). En este capítulo, la mejor solución de compromiso estuvo más cerca de los compuestos de 16 días que de los de 8.

Una de las bases de la incertidumbre asociada a la conveniencia de compuestos del sensor MODIS de 8 o 16 días es que no es posible conocer la fecha efectiva de observación de cada píxel del compuesto, por lo que hay que asignar una fecha determinada, por ejemplo el día central del compuesto, a todos los píxeles que lo conforman, y a partir de ahí generar interpolaciones temporales para completar la serie. Actualmente se encuentra disponible una nueva versión de las imágenes MODIS (MODIS Collection 5, Didan y Huete 2006) provenientes del reprocesamiento completo de los archivos desde el año 2000 utilizando una nueva versión de los algoritmos de cálculo y corrección. Esta versión incorpora varias mejoras (Didan y Huete 2006), pero fundamentalmente hay dos características que podrían mejorar sensiblemente la precisión del seguimiento temporal detallado de la vegetación. Por un lado se presentan como compatibles los datos del sensor MODIS a bordo del satélite TERRA (el utilizado en este trabajo) y los del sensor MODIS a bordo del satélite AQUA (un segundo satélite lanzado en 2002 que orbita de forma equivalente al TERRA pero tomando imágenes a las 13:30hs hora local en lugar de a las 10:30hs hora local). La producción de los compuestos de 16 días de cada satélite se plantea “en fase” de forma tal que los compuestos comienzan con 8 días de retraso uno de otro lo que permite que combinando ambas series se logre un seguimiento cada 8 días con calidad de compuestos de 16 días. La segunda característica mejorada es que se informa en los archivos la fecha de la observación efectiva seleccionada dentro del compuesto. Estas mejoras abren la posibilidad a mejorar significativamente la precisión del seguimiento temporal del funcionamiento de la vegetación, especialmente en sistemas dinámicos como pasturas implantadas y cultivos.

La medición de reflectancia con sensores multiespectrales en tierra o con sensores a bordo de aviones brinda la oportunidad de evaluar el funcionamiento de sensores a bordo de satélites (Fensholt et al. 2004). En particular permite evaluar el grado de distorsión que las correcciones atmosféricas y la georreferenciación pueden estar introduciendo en un producto determinado (Tan et al. 2006). En este trabajo solo fue posible realizar mediciones con un sensor hiperespectral en cuatro píxeles en solo una de las fechas de muestreo. Ambos sensores mostraron valores de reflectancia en rangos comparables en el rojo y el infrarrojo cercano, y el ordenamiento entre los píxeles en general se respetó aunque no totalmente (Fig. 3.7). Los datos del sensor hiperespectral aquí presentados no son suficientes para realizar una evaluación acabada del sensor MODIS, por lo que en trabajos futuros sería conveniente incluir las mediciones con este tipo de sensor en un rango de condiciones más amplio.

En resumen, muchos trabajos utilizan imágenes satelitales para estimar el funcionamiento y la estructura de la vegetación pero son muy escasas las evaluaciones directas de la precisión con la que el sensor utilizado estima las características biofísicas en estudio. En este Capítulo se presentó una evaluación de la capacidad del sensor MODIS para evaluar la fracción de la radiación incidente interceptada por cultivos de trigo en condiciones de producción reales. Esta evaluación fue posible gracias a la conveniente solución de compromiso entre resolución espacial y temporal del sensor MODIS, y a la excelente georreferenciación y post procesamiento asociados al proyecto. La información

de reflectancia presente en las imágenes de la versión 4 (*MODIS Collection 4*) del sensor MODIS se mostró muy precisa para estimar la dinámica de la fRFAA a escala de píxel. Entre los índices de vegetación evaluados, el IVM presentó un comportamiento más deseable para estimar la fRFAA en estas condiciones. La nueva versión de los algoritmos del proyecto MODIS presenta nuevas oportunidades para mejorar la precisión en el seguimiento de la vegetación de la serie temporal que alcanza ya los 10 años. No está aún definida la fecha de finalización de la misión MODIS, pero es necesario analizar las características de los sensores que podrán ser utilizados en el futuro para aplicaciones similares.

CAPÍTULO 4. Variabilidad de la Eficiencia en el Uso de la Radiación de pasturas consociadas ante variaciones de disponibilidad de recursos, manejo, y escala temporal

4.1 Introducción

El marco de referencia de la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) es ampliamente utilizado en ecofisiología vegetal y agronomía porque relaciona la productividad con uno de sus determinantes principales: la radiación fotosintéticamente activa absorbida o interceptada (RFAA, Monteith 1972). Numerosos modelos utilizan un valor de EUR previamente caracterizado para un cultivo o tipo de vegetación determinado – aún ante un rango de condiciones ambientales más o menos variables- para derivar la tasa de acumulación de biomasa en función de la RFAA (Ruimy y Saugier 1994, Running et al. 2000, Hill et al. 2004). La EUR es habitualmente estimada relacionando estimaciones independientes de productividad y RFAA para un mismo período (como en el Capítulo 2 de esta tesis). En los modelos las variaciones de EUR son consideradas utilizando valores de EUR calculados en condiciones similares a las que se intenta representar o modificando un valor general de EUR con coeficientes que consideren las variaciones del caso puntual.

Caracterizar la EUR para una serie de condiciones mediante un valor “promedio” es una simplificación de una realidad más compleja. Para una comunidad (una pastura o cultivo, por ejemplo) compuesta por un grupo de especies determinado, la EUR tiene un máximo comparable con el rendimiento fotosintético medido a nivel de hoja en condiciones ambientales óptimas (Turner et al. 2003), que depende de las eficiencias de las especies intervinientes y de sus abundancias relativas en la comunidad. Sin embargo, las bajas temperaturas y las restricciones hídricas y nutricionales, entre otros factores, impiden que en el campo se alcance ese valor. En este contexto, ante un estrés ambiental la PF puede ser reducida por una disminución de la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida (fRFAA), de la EUR, o de ambos actuando juntos o desfasados en el tiempo (Russell et al. 1989, Bondeau et al. 1999). Se ha propuesto que esta respuesta de la vegetación depende de la intensidad y duración del estrés y del tipo de vegetación (García et al. 1988, Joel et al. 1997). En efecto, según el modelo conceptual del *balance de recursos* (Chapin et al. 1987, Field 1991, Field et al. 1995), la energía que las plantas invierten en adquirir distintos recursos está determinada por el más limitante. Esto optimizaría el uso de los recursos y evitaría, por ejemplo, un excesivo desarrollo de área foliar (inversión en adquisición de luz) en una situación en que el N disponible no alcance para mantener la fotosíntesis de ese área foliar. Este argumento ha sido postulado como una de las causas de la mayor variabilidad relativa que suele presentar la RFAA respecto a la EUR, porque si el canopeo generara más área foliar que la que los recursos ambientales le permiten mantener activa disminuiría la EUR.

La información disponible sobre el impacto de estreses ambientales (como deficiencias de nitrógeno, agua, y radiación) y del manejo de la defoliación de pasturas sobre la fRFAA y la EUR muestra que ambas variables pueden ser alteradas. Con respecto a la condición nitrogenada, por ejemplo, se ha observado que la EUR de distintos cultivos varía en función del contenido de N de las hojas (Sinclair y Horie 1989,

Hall et al. 1995). Agnusdei et al. (2010) y Belanger et al. (1992, 1997) encontraron que la deficiencia de N afecta más la EUR que la fRFAA una vez que el canopeo alcanza niveles altos de intercepción. Gastal y Lemaire (2002) y Belanger et al. (1994), en cambio, muestran que la expansión foliar es más sensible a la disponibilidad de N que la capacidad fotosintética del canopeo. El estrés hídrico también reduce la interceptación de radiación y la EUR, pero no está claro cuán severo tiene que ser el estrés para tener un impacto significativo sobre una y otra variable (Muchow 1985, Garcia et al. 1988, Joel et al. 1997, Gastal y Durand 2000, Collino et al. 2005). Akmal y Janssens (2004) encontraron que la deficiencia hídrica tuvo un efecto mayor que la deficiencia de N sobre la EUR. En el caso de la radiación incidente, la saturación lumínica comúnmente observada a escala de hoja puede también ocurrir a escala de canopeo (Ruimy et al. 1995, Medlyn et al. 2003, Turner et al. 2003). Esta saturación lumínica reduciría la EUR en días de alta irradiancia, lo cual no ha sido suficientemente considerado en modelos ecofisiológicos que operan a escala de canopeo. Además la presencia de nubosidad que disminuye la radiación incidente y aumenta la proporción de radiación difusa suele aumentar la EUR porque mejora la distribución de luz en los distintos estratos del canopeo (Sinclair et al. 1992, Turner et al. 2003, Greenwald et al. 2006, Saseendran et al. 2008). Por último, respecto al manejo de la defoliación, Teixeira et al. (2008) observaron aumentos de la EUR en pasturas de alfalfa al reducir la duración del período de rebrote en primavera, pero no encontraron diferencias durante el verano. Conant et al. (2003), por su parte, no encontraron efectos de los tratamientos de defoliación sobre la EUR en pasturas consociadas de gramíneas y leguminosas. Sin embargo, ambos trabajos se concentraron en la frecuencia y no en la intensidad de la defoliación.

La escala temporal a la que se analizan las respuestas de la fRFAA y la EUR (semanal, mensual, o anual) agrega una dimensión adicional sobre la que hay menos información disponible (Running y Nemani 1988, Ruimy et al. 1995, Medlyn et al. 2003). En otros tipos de vegetación existen evidencias, sin embargo, de que la respuesta de las plantas al estrés se manifiesta en fRFAA o EUR en función del período de tiempo que se esté considerando (Medlyn 1998, Medlyn et al. 2003). Es posible que variaciones de corto plazo de la EUR sean imperceptibles a escalas temporales más prolongadas porque el área foliar cambie rápidamente tendiendo a niveles que estén en consonancia con la oferta de recursos del ambiente, tal como lo predice la teoría del balance de recursos citada previamente.

Los sistemas de producción ganaderos de las regiones templadas basan en gran medida su producción de forrajes en pasturas perennes consociadas de gramíneas (habitualmente festuca, raygras o pasto ovillo) y leguminosas (alfalfa o tréboles, Soussana y Oliveira Machado 2000). En estos sistemas la fijación biológica de nitrógeno por parte de la leguminosa provee de nitrógeno también a la gramínea disminuyendo así los requerimientos de fertilizantes nitrogenados para un dado nivel de producción (Ledgard y Steele 1992). Además, la inclusión de la leguminosa en la mezcla suele aumentar el contenido de nitrógeno y la digestibilidad de la dieta (Frame y Newbould 1986). Por distintas razones es esperable que la EUR de estos sistemas sea menos estable que la de, por ejemplo, cultivos anuales. En primer lugar la EUR surge de la combinación de las eficiencias de cada una de las especies de la mezcla y de su participación relativa, que es variable a lo largo del año. Además, la fisiología de crecimiento de las leguminosas que involucra la transferencia de hasta un 45% de los fotoasimilados a estructuras subterráneas en ciertos momentos del año, posiblemente incremente aún más las variaciones estacionales de la EUR de la biomasa aérea (Teixeira et al. 2007). La complejidad de las interacciones que tienen lugar en las pasturas consociadas limita la

aplicabilidad, en estos sistemas, de resultados provenientes de sistemas experimentales monoespecíficos, más sencillos, y pone de relevancia la necesidad de generar información ecofisiológica que incluya tales interacciones. Así, el posible comportamiento diferencial de la festuca y la alfalfa a la defoliación y a condiciones de estrés hídrico y nitrogenado frecuentes en los sistemas de producción ganaderos, y la amplia difusión de este tipo de pasturas, determina la necesidad de estudiarlas en sistemas mixtos.

El marco de referencia de la EUR ha sido ampliamente utilizado para estimar la productividad primaria a distintas escalas y en distintos tipos de vegetación (Sinclair y Muchow 1999, Running et al. 2000, Running et al. 2004), y ha probado ser una aproximación útil para estimar la PF de sistemas de producción ganaderos (Paruelo et al. 2000b, Hill et al. 2004, Piñeiro et al. 2006). Estos sistemas complejos se caracterizan por ser multiespecíficos, estar sometidos a distintos estreses por escasez de recursos a lo largo del año, y a un manejo de la defoliación que modifica constantemente la estructura de la pastura. Se necesita conocer mejor el efecto de estas condiciones de disponibilidad de recursos y de manejo sobre los componentes del modelo de EUR para poder ajustar su funcionamiento y aumentar la precisión de las estimaciones que se generan. Collino et al. (2005) en pasturas monoespecíficas de alfalfa y Gastal et al. (2000) en pasturas de festuca concluyeron que la fRFAA se modifica más que la EUR ante un estrés hídrico. Estas respuestas a estreses ambientales no han sido suficientemente estudiadas en pasturas multiespecíficas, donde se combinan especies que pueden tener respuestas distintas y que manifiestan relaciones de competencia. La variabilidad de la EUR en relación a la escala temporal es un aspecto central para una completa caracterización de la EUR (Field et al. 1995, Ruimy et al. 1995, Joel et al. 1997, Medlyn et al. 2003) pero no ha sido estudiada aún.

Los objetivos de este Capítulo son:

- *Determinar, en una pastura consociada, el impacto relativo de déficits de disponibilidad de recursos y del manejo de la defoliación sobre la productividad forrajera y sus dos componentes: la fRFAA y la EUR.* La hipótesis planteada en relación a este objetivo es, como se ha observado en otros sistemas (Gastal y Durand 2000, Collino et al. 2005), que los cambios en PF ante situaciones de estrés son determinados en mayor medida por la fRFAA que por la EUR. La predicción que se desprende es que los tratamientos de estrés reducirán más la fRFAA que la EUR respecto al control sin estrés.
- *Determinar, en la misma pastura, el impacto de la escala temporal sobre las variaciones de EUR ante situaciones de estrés.* La hipótesis planteada en relación a este objetivo es que la variabilidad de la EUR de pasturas a lo largo del tiempo es menor cuando se consideran períodos más prolongados (semana > mes > estación) que permiten que el canopeo ajuste su fRFAA a los niveles en equilibrio con la oferta de recursos del ambiente. La predicción que se desprende de esta hipótesis es que la bondad de ajuste de la relación PF-RFAA será mayor (es decir, la EUR menos variable) cuando se consideren períodos de tiempo más largos, por ejemplo, un mes vs. una semana.

4.2 Metodología

4.2.1 Descripción del sitio y la pastura

Se desarrolló un experimento en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Pergamino (latitud: 33° 57' S, longitud: 60° 34' O). El clima es templado sub-húmedo. La precipitación media anual de 975 mm se distribuye homogéneamente durante primavera, verano y otoño, y se reduce a la mitad en invierno. La temperatura media mensual varía desde 9.8°C en julio hasta 23.3°C en enero. Entre abril y octubre ocurren en promedio 48 heladas agronómicas (intemperie a 5 cm del suelo). El experimento se desarrolló sobre un suelo Argiudol típico (pH=6.0-6.1; %M.O.=3.89-3.95 y P=18-22 ppm), correspondiente a la Serie Pergamino (INTA) que comprende a suelos típicamente agrícolas, profundos, con excelente estructura y fertilidad.

El experimento se instaló sobre una pastura consociada de leguminosa y gramínea: alfalfa (*Medicago sativa*, cultivar Victoria INTA SP, grupo de latencia 6, sembrada a 8.5 Kg/ha) y festuca alta (*Festuca arundinacea*, cultivar Flecha, tipo Mediterránea, sembrada a 7.5 Kg/ha). La siembra se realizó el 3 de mayo de 2004 bajo labranza convencional en hileras puras (monoespecíficas) alternadas a 16 cm. A la siembra se fertilizó en bandas con 50 Kg/ha de fosfato diamónico (N:18-P:46-K:0). Hasta la instalación del experimento la pastura fue utilizada bajo pastoreo rotativo con novillos en engorde. La pastura estuvo ubicada en el sector ganadería de la experimental, a cargo de los Ing. Agr. Omar Scheneiter y Oscar Bertín.

4.2.2 Diseño experimental

El experimento se instaló en junio de 2005 y duró un año. En cada estación del año se trabajó sobre áreas contiguas de 15x45 m excluidas al pastoreo. Dentro de cada estación, el diseño fue en bloques completos aleatorizados con estructura factorial de tratamientos, con 3 repeticiones. Treinta parcelas de 2X3 m cada una se dispusieron en una grilla de 3 columnas por 10 filas con borduras de 1 m y se las sometió a la siguiente combinación factorial (2X5) de tratamientos:

- Factor Defoliación:
 - Severa (Def 7)
 - Leve (Def 15)
- Factor disponibilidad de recursos:
 - Riego (R, considerado el tratamiento testigo)
 - Riego y fertilización con P y N (FR)
 - Sequía temporaria (ST)
 - Sequía permanente (SP)
 - Sombreo (S).

El factor defoliación representa dos intensidades contrastantes dentro del manejo del pastoreo rotativo al que habitualmente son sometidos estos sistemas de producción. El factor disponibilidad de recursos representa, por un lado, un gradiente de disponibilidad hídrica, habitualmente el factor de estrés principal en estos sistemas. Por otro lado, la

fertilización representa lotes de distinta disponibilidad de nutrientes y el tratamiento de sombreo situaciones de baja disponibilidad de radiación solar incidente debidas, por ejemplo, a alta nubosidad. A continuación se describe cada tratamiento (Fig. 4.1).

Defoliación: Los tratamientos de defoliación consistieron en cortar con hélice toda la parcela dejando la pastura con una altura remanente de 7 cm (Def 7) o 15 cm (Def 15). Estos tratamientos se aplicaron al inicio y a la mitad de cada estación, cada 45 días aproximadamente. Así, quedaron definidos 8 períodos de rebrote en todo el experimento.

Riego: El tratamiento de riego fue regado como para mantener el perfil del suelo cercano a la capacidad de campo

Sequía temporaria: El tratamiento sequía temporaria fue sometido a sequía en el primer período de rebrote de cada estación (primera mitad de la estación) y luego regado como para mantener el perfil del suelo cercano a la capacidad de campo.

Sequía permanente: El tratamiento de sequía permanente fue mantenido en sequía durante toda la estación.

Fertilización: El tratamiento fertilizado recibió al comienzo de cada estación una mezcla de fosfato diamónico y urea (200 Kg/ha de N y 75 Kg/ha de P) y en la mitad de cada estación solo urea a razón de 40 Kg/ha de N. Fue regado como para mantener el suelo cercano a la capacidad de campo de manera similar al tratamiento riego.

Sombreo: El tratamiento sombreo recibió períodos de sombra que simulaban una secuencia de días nublados. Para ello se utilizaron marcos de hierro de 60X80 cm y 60 cm de altura cubiertas con tela media-sombra de interceptación del 50%. Cada marco se ubicó en un sector de la parcela de sombreo por aproximadamente 12 días. Al terminar ese período las mediciones (ver más adelante) se hicieron en ese sector de la parcela que había estado sombreado. Este tratamiento fue regado como para mantener el suelo cercano a capacidad de campo de manera similar al tratamiento riego. Los tratamientos de sombreo se aplicaron solo en ciertos períodos, por lo que los resultados se analizan por separado, utilizando como testigo a las parcelas del tratamiento riego.

Manejo del agua: Para las parcelas regadas (tratamientos riego, fertilización, sombreo y segundo período de rebrote de la sequía temporaria), el riego fue por goteo con un sistema automatizado con electroválvulas y cintas de goteo espaciadas a 40 cm con goteros cada 20 cm, que permitió humedecer completa y homogéneamente la superficie en cada riego. Se regó aproximadamente cada 3-6 días con láminas de entre 10 y 20 mm según el consumo de agua. El riego fue mayor al consumo y ello generó percolación profunda y en ciertos momentos exceso hídrico en las parcelas regadas (particularmente en la segunda mitad del verano). Las parcelas con tratamientos de sequía (sequía permanente y primer período de rebrote de la sequía temporaria) no se regaron y se les excluyeron gran parte de las precipitaciones con cobertores de lluvia móviles que se ubicaban en cada parcela ante la presencia de tormentas en forma precautoria. Los cobertores fueron estructuras metálicas de 2X3 m y 0.7 m de altura con patas con ruedas y techo de policarbonato translúcido en pendiente y con una canaleta que recuperaba el agua que era conducida fuera del experimento con caños de polietileno de 1.5 pulgadas (Imagen 4.1). Un empleado de campo que vivía junto al experimento ponía y sacaba los cobertores y anotaba la hora exacta. De esta forma, y con datos de una estación meteorológica automática que registró las precipitaciones cada 10 minutos,

se calculó la precipitación de las parcelas en sequía. Además se registró la radiación y la temperatura en parcelas con y sin cobertores. Así se pudo considerar la reducción de radiación incidente en las parcelas de sequía en las horas que los cobertores permanecieron puestos (el policarbonato aunque translúcido absorbió un 15% de la radiación incidente). Durante el año los cobertores se colocaron 99 veces en las parcelas con tratamiento de sequía permanente por un total de horas equivalente a 108 días, un 30% de la duración total del experimento.

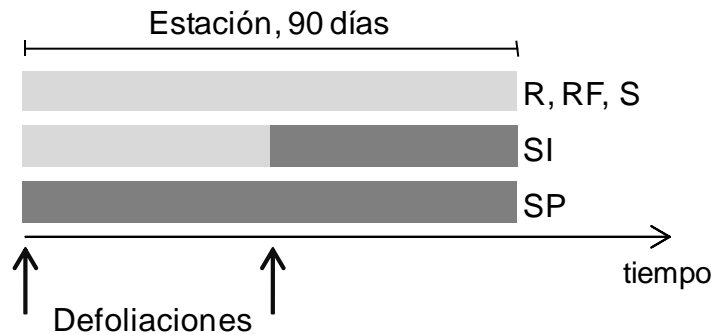


Figura 4.1. Dinámica temporal del manejo del agua durante cada estación del año (barra gris claro, riegos hasta capacidad de campo, barra gris oscuro, sequía). Las flechas indican la aplicación de los tratamientos de defoliación, al inicio y en la mitad de la estación.



Imagen 4.1. Cobertores de exclusión de las precipitaciones y estación meteorológica. Los cobertores se muestran al costado del experimento, donde se ubicaban en días sin tormenta. Notar la boquilla en la canaleta que descargaba el agua en un caño que la conducía fuera del experimento.

4.2.3 Mediciones y escalas temporales

Aproximadamente cada 12 días se cosechó la biomasa acumulada en pie para estimar la PF y se midió la radiación incidente a distintas alturas del canopeo para estimar la fRFAA. Tanto las cosechas de biomasa como las determinaciones de fRFAA se

realizaron siempre en subparcelas que no habían sido utilizadas previamente para estas determinaciones. En adelante se hace referencia al intervalo entre estas mediciones como *período decádico* (cercano a 10 días), al intervalo entre la aplicación de los tratamientos de defoliación como *período de rebrote* (aproximadamente 45 días), y al conjunto de dos rebrotes consecutivos dentro de la misma estación del año como *estación* (aproximadamente 90 días, Tabla 4.1).

Fecha inicio	Decádico	Rebrote	Estación
12-Jun-05	1 (10)		
22-Jun-05	2 (9)		
1-Jul-05	3 (11)	1 (45)	
12-Jul-05	4 (15)		Invierno (88)
27-Jul-05	5 (13)		
9-Aug-05	6 (17)	2 (43)	
26-Aug-05	7 (13)		
14-Sep-05	8 (12)		
26-Sep-05	9 (10)	3 (45)	
6-Oct-05	10 (11)		
17-Oct-05	11 (12)		Primavera (90)
29-Oct-05	12 (10)		
8-Nov-05	13 (13)	4 (45)	
21-Nov-05	14 (11)		
2-Dec-05	15 (11)		
19-Dec-05	16 (10)		
29-Dec-05	17 (13)	5 (50)	
11-Jan-06	18 (13)		
24-Jan-06	19 (14)		Verano (96)
7-Feb-06	20 (23)		
2-Mar-06	21 (13)	6 (46)	
15-Mar-06	22 (10)		
28-Mar-06	23 (10)		
7-Apr-06	24 (10)	7 (46)	
17-Apr-06	25 (12)		
29-Apr-06	26 (14)		Otoño (80)
13-May-06	27 (10)		
23-May-06	28 (13)	8 (34)	
5-Jun-06	29 (11)		

Tabla 4.1. Escalas temporales de análisis del experimento. Entre paréntesis se indica la duración en días de cada periodo. Decádico: periodo de revisita al experimento para realizar mediciones, duración promedio 12 días. Rebrote: periodo entre la aplicación de los tratamientos de defoliación, duración promedio 45 días. Estación: periodo de 2 rebrotes correspondientes a cada estación del año, duración promedio 90 días.

Las variables meteorológicas fueron registradas cada 10 minutos con una estación meteorológica automática (VantagePro2 con sensor de radiación incidente, *Davis Instruments*) instalada junto al experimento. En el suelo se instalaron sensores de humedad volumétrica (ECH₂O *Decagon Devices*, método de constante dieléctrica) a 3 profundidades: 0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm en 4 parcelas con tratamientos hídricos y niveles de defoliación contrastantes. Los sensores estuvieron conectados a *dataloggers*

(*Cavadevices*) que registraban las lecturas cada 15 minutos. Principalmente debido a continuas fallas de funcionamiento de los dataloggers solo una parte de los registros pudieron ser utilizados para el análisis.

4.2.4 Estimación de la PF

La PF ($\text{g/m}^2/\text{día}$) se estimó utilizando las cosechas de biomasa al ras del suelo realizadas en cada parcela (Fig. 4.2). En el laboratorio las muestras fueron separadas en cuatro componentes: festuca verde, festuca muerta, alfalfa verde, y alfalfa muerta. Luego fueron secadas en estufa a 70°C hasta peso constante y pesadas. Se analizaron en detalle distintos métodos para, a partir de las cosechas, estimar la PF a las tres escalas temporales: decádico, rebrote, y estación (Biondini et al. 1991, Sala y Austin 2000). Se utilizó la materia seca verde y se estimó la PF de festuca y alfalfa por separado y luego la suma de ambas fue la PF de la parcela. A la escala de decádico la PF fue la diferencia positiva de materia seca verde entre dos cosechas. A la escala de período de rebrote la PF fue la pendiente positiva de la regresión lineal entre acumulación de materia seca verde y el tiempo en días. A la escala de estación la PF fue el promedio, ponderado por la duración, de la PF de sus dos períodos de rebrote.

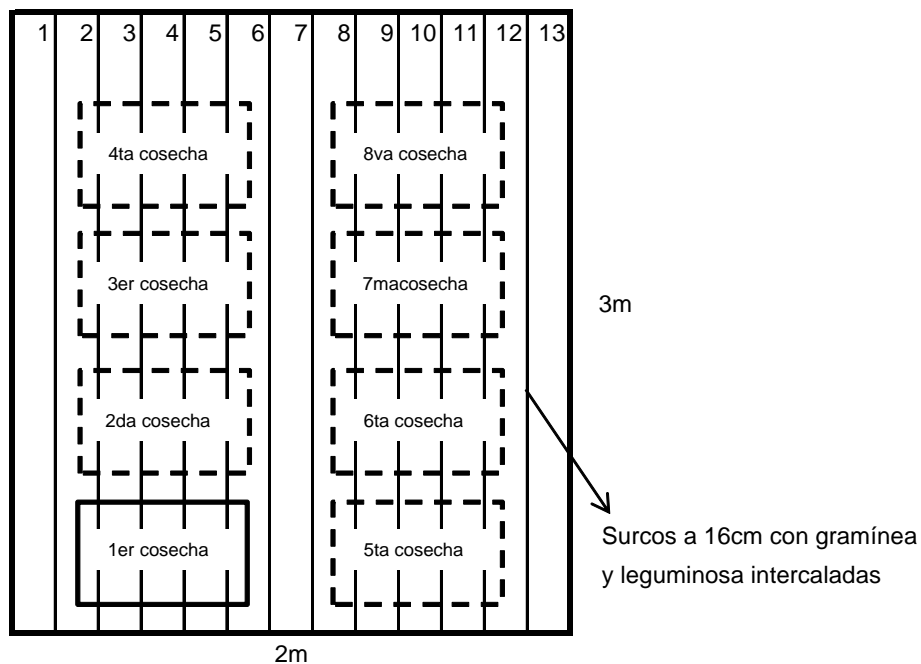


Figura 4.2. Esquema de una parcela. Las líneas llenas verticales corresponden a los surcos de siembra. Los rectángulos muestran la ubicación de los marcos de 64X40 cm en las sucesivas cosechas a lo largo de una estación. Nótese los surcos dejados como bordura. Cada marco incluía dos surcos de festuca y dos de alfalfa, en un área total de 0.256 m², que se cosechaban a ras del suelo.

4.2.5 Estimación de la fRFAA

Para estimar la fRFAA se midió la radiación incidente a distintas alturas del canopeo (siempre entre las 11 y las 13 h) en el sector de la parcela donde el mismo día se realizaría la cosecha. Para ello se utilizó una barra integradora de la densidad del flujo de fotones fotosintéticos de 50 cm de longitud especialmente delgada para su utilización

en pasturas (*Cavadevices*). La metodología para estimar fRFAA con la barra fue equivalente a la descrita en el Capítulo 3: se realizaron tres lecturas por parcela con la barra hacia arriba: (lectura 1) bajo el canopeo, (lectura 2) sobre el canopeo y (lectura 3) nuevamente bajo el canopeo. De esta forma se obtuvieron dos lecturas representativas del valor más variable: bajo el canopeo. Luego se calculó la fRFAA como: $fRFAA = \text{Promedio (lectura1, lectura3)} / \text{lectura2} * 100$. Esta forma de estimar la fRFAA es una simplificación habitualmente utilizada que captura los principales componentes del flujo de radiación con mediciones simples, y que no contempla la pérdida de radiación reflejada (albedo) ni la absorción de radiación reflejada por el suelo (Russell et al. 1989).

Como se discutió en el Capítulo 3, la fRFAA así estimada incluye la interceptación de radiación por parte de las hojas verdes y de los componentes muertos del canopeo ($fRFAA_{\text{verde+seco}}$). Sin embargo, en el contexto del modelo de la EUR, interesa conocer solo la fRFAA por lo verde, que es la parte fotosintéticamente activa del canopeo, *i.e.* lo que define la PF, y lo que se estima a partir de teledetección. Para calibrar y validar una corrección de la $fRFAA_{\text{verde+seco}}$ para estimar la fRFAA por lo verde, en 10 de los 29 periodos decádicos se midió la reflectancia con un sensor de mano *Skye* (630nm y 700nm) y el albedo con la barra ubicada a 30 cm del canopeo, apuntando a la pastura. Luego la $fRFAA_{\text{verde+seco}}$ se corrigió con la siguiente ecuación:

$fRFAA = fRFAA_{\text{verde+seco}} * \text{Factor corrección}$, donde fRFAA es la fRFAA por tejido verde.

El Factor de corrección estuvo compuesto por el porcentaje de materia seca verde (MSV) en la muestra y su distribución vertical en el canopeo. La corrección parte del supuesto que cuando hay más cantidad absoluta de MSV (g/m^2) la MS muerta interfiere menos en la fRFAA porque está en los estratos más bajos del canopeo. Este supuesto se basa en una observación sistemática de este patrón en el campo.

$\text{Factor corrección} = \%MSV + \%MS \text{ muerta} * MSV \text{ relativa}$

$MSV \text{ relativa} = (MSV \text{ act} - MSV \text{ min}) / (MSV \text{ max} - MSV \text{ min})$

Donde MSV act es la MSV de la muestra en cuestión, MSV max y MSV min son el percentil 0.95 y 0.05 del total de observaciones del experimento. Entonces, si la MSV relativa es 1 (muchas MSV), el Factor de corrección es 1 y la fRFAA resultante es igual a la $fRFAA_{\text{verde+seco}}$, es decir que no se la corrige por material muerto (se supone que este está en estratos bajos, que no interfieren). Si la MSV relativa es 0 o cercana a 0 (poca MSV), el Factor de corrección es igual a $\%MSV$ y la fRFAA es igual a la que surgiría de una corrección de multiplicar la $fRFAA_{\text{verde+seco}}$ por el $\%MSV$. Es decir que el mínimo valor de fRFAA posible es aquel dado por el producto de $fRFAA_{\text{verde+seco}} * \%MSV$. Notar que si el $\%MSV$ es alto, el Factor de corrección será alto, aún cuando la MSV relativa sea 0. Es decir que la fRFAA será reducida respecto de la $fRFAA_{\text{verde+seco}}$ cuando haya alto porcentaje de material muerto y poca MSV (g/m^2). La corrección aplicada a los datos del experimento redujo la $fRFAA_{\text{verde+seco}}$ a valores de fRFAA similares (para un dado valor de IVN) a los obtenidos en el Capítulo 3 en canopeos sin material muerto (Fig. 4.3).

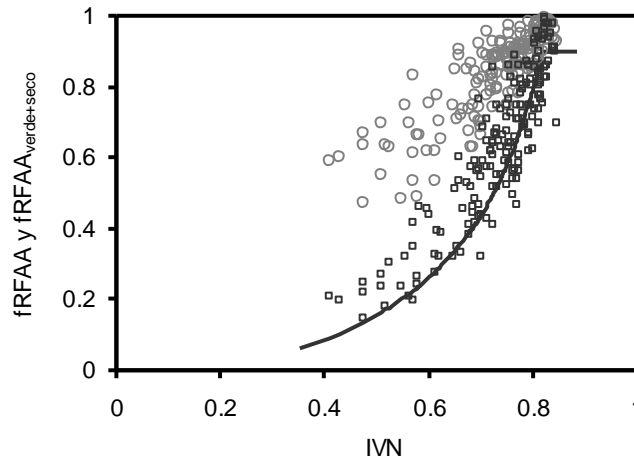


Figura 4.3. $fRFAA_{verde+seco}$ (círculos grises) y $fRFAA$ corregida (cuadrados negros) en función del índice de vegetación normalizado calculado a partir de mediciones de reflectancia a campo con un sensor de mano Skye (rojo = 630 nm, infrarojo cercano = 700 nm). La línea negra muestra la relación $fRFAA$ -IVN generada en el Capítulo 3 para cultivos de trigo sin material muerto.

4.2.6 Análisis de la EUR

Para el análisis del efecto de factores ambientales y de manejo sobre la EUR, ésta se calculó como la pendiente de la regresión lineal entre la PF y RFAA acumulada para cada período de rebrote en cada parcela. Se eliminaron los puntos que no presentaban acumulación adicional de biomasa, o que la misma se había frenado marcadamente, para no subestimar artificialmente la EUR. Para el análisis de la variabilidad de la EUR a distintas escalas temporales se plantearon las regresiones entre PF y RFAA con la información de los distintos tratamientos y períodos para una escala determinada. Se utilizó el coeficiente de determinación simple (R^2) de la regresión como estimador de la variabilidad de la EUR a esa escala en particular; menores valores de R^2 indican más variabilidad de la EUR.

La predicción asociada a la hipótesis de la variabilidad de la EUR es que el coeficiente de determinación simple (R^2) de la relación PF-RFAA de distintos tratamientos de disponibilidad de recursos aumentará gradualmente al ir aumentando la longitud del período considerado (porque disminuirá la variabilidad de la EUR). Sin embargo, para poner a prueba esta predicción es necesario considerar que, por cuestiones metodológicas, estimar la PF para escalas de tiempo cortas está asociado a un mayor error aleatorio (Biondini et al. 1991, Sala y Austin 2000). Esto generaría efectos confundidos porque a escalas cortas una parte de la variabilidad de la EUR se debería a la mayor variabilidad de la estimación de la PF a esa escala, que es una cuestión meramente metodológica. Para diferenciar esta variabilidad de la variabilidad *per se* de la EUR que se quiere poner a prueba, se realizó un procedimiento para generar un “modelo nulo” de comparación que contemple el error aleatorio en el cálculo de la PF a distintas escalas temporales.

Para generar el modelo nulo se calcularon las regresiones de PF en función de RFAA con los datos de campo para las tres escalas temporales: estación (90 días, 4 estaciones, $PF=0.81 \cdot RFAA+26.22$, $R^2=0.86$, $n=32$); rebrote (45 días, 8 períodos de rebrote, $PF=1.01 \cdot RFAA+52.93$, $R^2=0.77$, $n=64$); y período decádico (12 días, 27 períodos

decádicos, $PF=0.92 \cdot RFAA + 141.52$, $R^2=0.26$, $n=232$). Los datos provienen de un total de ocho tratamientos y cada punto es el promedio de tres repeticiones del mismo tratamiento. Se calcularon las varianzas de las variables x (RFAA) e y (PF) y se definieron 11 pares de puntos x - y homogéneamente distribuidos sobre el modelo de regresión. Luego con los 11 valores de PF y RFAA, y sus correspondientes varianzas, se generaron distribuciones normales de 2000 valores cada una. Es decir que para cada escala temporal se generó un conjunto de 22000 valores. Luego se extrajeron aleatoriamente de ese conjunto pares de puntos para generar nuevas regresiones, con n igual a las regresiones originales (estación=32, rebrote=64, y decádico=232). Se generaron 15 regresiones para cada escala temporal. El R^2 promedio de estas regresiones fue 0.81, 0.80, y 0.59 para estación, rebrote, y decádico respectivamente. En definitiva, con la variación de la RFAA y la PF propia de los datos de las distintas escalas temporales de análisis sería esperable obtener R^2 parecidos para las escalas estación y rebrote, y más bajos para la escala decádica. El apartamiento de los valores observados respecto de estos valores simulados será interpretado como un efecto *per se* de la escala temporal de análisis sobre la relación PF-RFAA, es decir, sobre la EUR.

4.2.7 Agua en el suelo

Para cuantificar el nivel de estrés hídrico al que efectivamente fueron sometidas las distintas parcelas se realizó un balance hídrico diario para los primeros 80 cm del perfil del suelo. Las variables de entrada fueron temperatura, precipitación, lámina de riego, humedad relativa, velocidad de viento, textura de suelo para cada horizonte, pendiente, y fRFAA de la parcela (interpolado linealmente entre fechas de medición, cada 12 días). Con esta información el modelo calcula la evapotranspiración potencial según Penmann-Monteith, los límites de capacidad de campo y punto de marchitez permanente del suelo, el K_c de la pastura para cada día (a partir de la fRFAA) y otras variables intermedias. Las principales variables de salida utilizadas en el análisis fueron la pérdida de agua del sistema por percolación profunda y escurrimiento, la evapotranspiración real de la pastura, el contenido de agua útil, y el cociente entre evapotranspiración real y potencial (ET/ETP). Este cociente es un indicador de la condición hídrica de la pastura porque informa la proporción efectivamente transpirada respecto del total que se habría transpirado si no hubiera habido limitaciones de disponibilidad de agua.

El modelo se parametrizó para los primeros 20 cm del suelo para poder evaluarlo con las mediciones realizadas con los sensores de humedad volumétrica de suelo. Solo para esta profundidad se logró obtener información confiable con los sensores, a lo largo de casi todo el experimento, y en tratamientos de manejo del agua contrastantes. El objetivo de realizar el balance hídrico fue cuantificar objetivamente el nivel de estrés aproximado de cada tratamiento, sin pretender una precisión elevada. En general las simulaciones realizadas con el modelo de balance hídrico fueron aceptables en este contexto porque lograron un seguimiento de las variaciones en el contenido de agua estimadas a campo con los sensores de humedad, y fueron sensibles a las diferencias de los tratamientos de manejo del agua (Fig. 4.4). Luego el modelo fue corrido para una profundidad de 0-80 cm y sus salidas utilizadas para interpretar los resultados de PF y EUR.

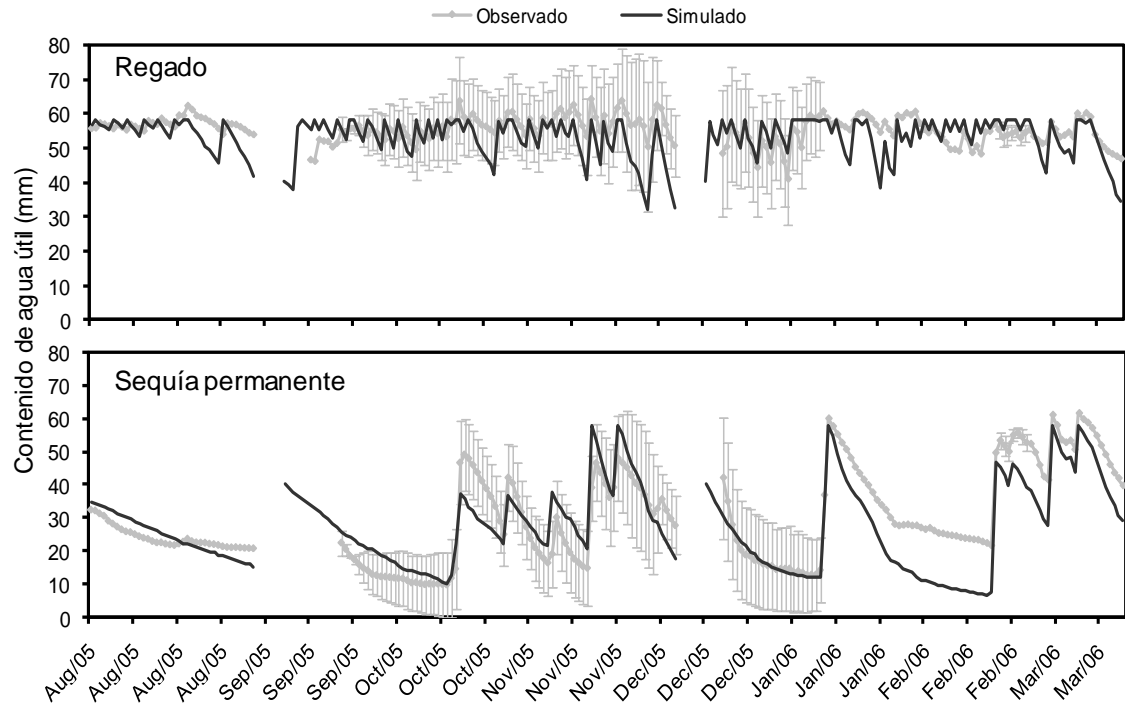


Figura 4.4. Contenido de agua útil hasta 20cm de profundidad a lo largo del experimento. La línea negra representa la salida del modelo de balance hídrico, la línea gris los datos medidos con los sensores. Se presentan los tratamientos riego (panel superior) y sequía permanente (panel inferior) en promedio para los dos niveles de defoliación. Las barras representan un desvío estándar para los períodos con datos para más de una parcela.

4.3 Resultados

La acumulación de materia seca verde y de RFAA a lo largo de cada período de rebrote respondió, en términos generales, a los tratamientos de disponibilidad de recursos y de manejo (Fig. 4.5). La materia seca verde, compuesta de proporciones variables de festuca y alfalfa, se incrementó desde el valor inicial, definido por el tratamiento de defoliación, hasta un máximo que dependió de los tratamientos aplicados y de la estación del año. En varios casos la biomasa acumulada se estabilizó, e incluso disminuyó, hacia el final del período de rebrote. Por su parte, la RFAA aumentó a lo largo del rebrote acompañando en general los aumentos de materia seca verde pero mostrando una variación entre días asociada a la nubosidad. Las variables presentadas contienen la información básica para alcanzar el primer objetivo de determinar el impacto relativo de distintos estreses ambientales sobre la PF y sus dos componentes: la *f*RFAA y la EUR. La PF se deriva de los cambios de la materia seca verde, y puede inferirse en la Fig. 4.5 a partir de la pendiente de acumulación de materia seca verde en el tiempo. La RFAA presentada en la Fig. 4.5 surge de multiplicar la *f*RFAA y la radiación fotosintéticamente activa incidente. Luego la EUR es el cociente entre la PF y la RFAA, o la razón de proporcionalidad entre la acumulación de biomasa y la RFAA (EUR, g/MJ). El análisis de la relación PF-RFAA y su variabilidad en las tres escalas temporales, decádico, rebrote y estación, permite determinar el impacto de la escala temporal sobre las variaciones de EUR ante situaciones de estrés, que es el segundo objetivo del capítulo.

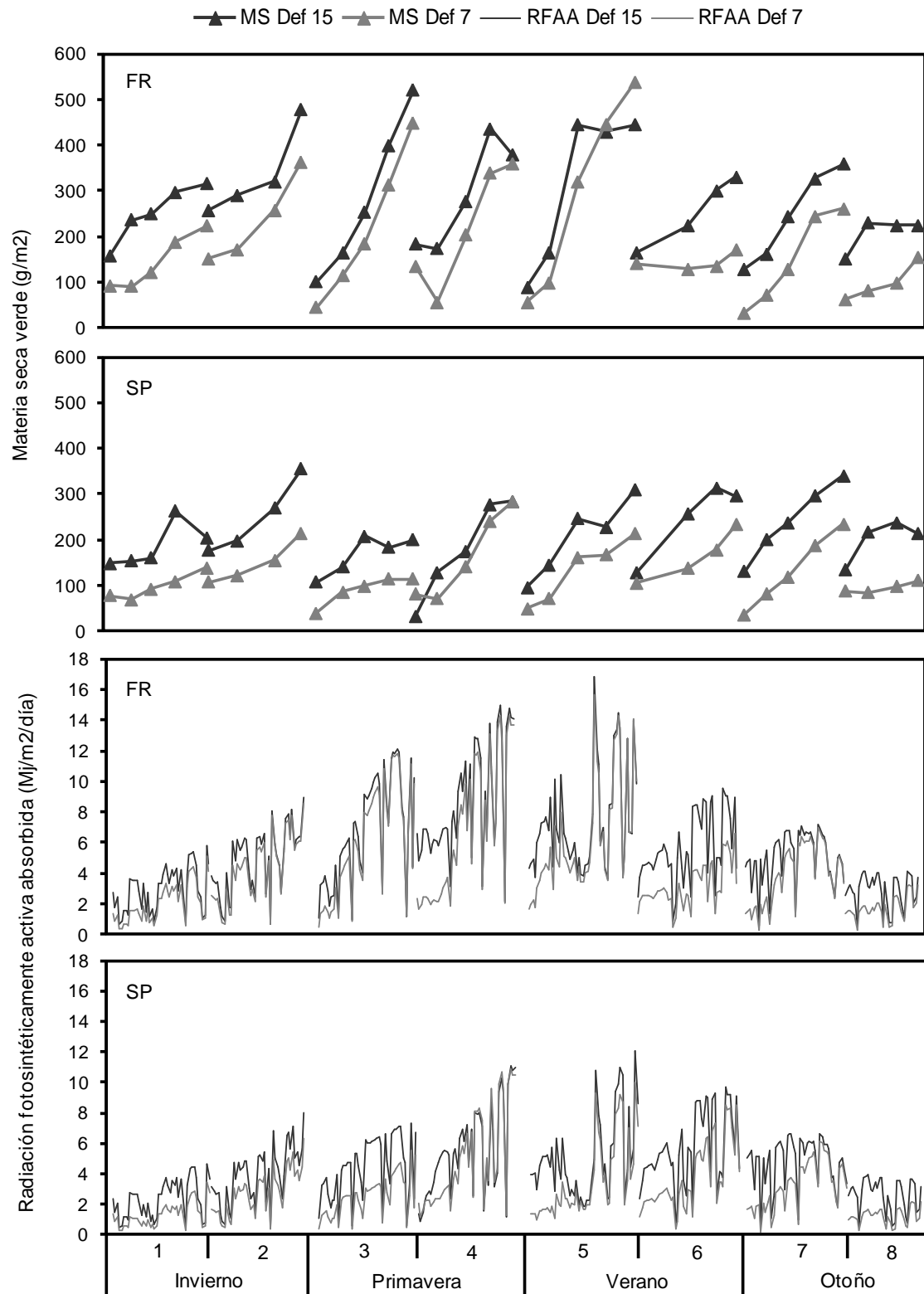


Figura 4.5. Cambios en la materia seca verde total y la RFAA a lo largo de los 8 períodos de rebrote del experimento para los tratamientos de fertilización y riego y sequía permanente. Se muestran estos tratamientos para clarificar la estructura temporal del experimento. La materia seca verde total es la suma de

festuca y alfalfa. La pendiente de la curva de la materia seca verde representa la productividad forrajera.

La PF de festuca y alfalfa respondió en forma diferencial, y en varias ocasiones opuesta, a los tratamientos de defoliación y de disponibilidad de recursos, y a las estaciones del año (Fig. 4.6). En ningún caso la interacción entre los tratamientos de disponibilidad de recursos y de defoliación fue significativa, razón por la cual la figura solo muestra los efectos principales de cada factor. Sin embargo, como el efecto de los tratamientos fue variable a lo largo del año se muestran los resultados por estación. La PF de festuca fue consistentemente mayor bajo defoliación leve que bajo defoliación severa. También aumentó con el aumento de la disponibilidad hídrica (FR y R>ST>SP), y este contraste fue especialmente marcado en invierno y primavera, las estaciones de mayor PF de festuca. La PF de alfalfa, en cambio, no se modificó por los tratamientos de defoliación en invierno, primavera y verano y aumentó bajo defoliación severa en otoño. Entre los tratamientos de disponibilidad de recursos, la sequía permanente redujo la PF en primavera y verano pero la aumentó en otoño, mientras que la fertilización no tuvo efecto significativo. Estacionalmente la alfalfa mostró valores muy bajos de PF en invierno, intermedios en otoño, y máximos en primavera y verano. La PF total integró las respuestas de las especies individuales: la PF se redujo bajo defoliación severa en primavera y verano. Ante cambios de disponibilidad de recursos fue reducida por la sequía temporaria en invierno y por la permanente en invierno, primavera y verano. Curiosamente, los efectos de los tratamientos sobre cada especie en el otoño se cancelaron mutuamente y como resultado la PF total no fue modificada por ningún tratamiento. Estacionalmente la PF total de la pastura fue máxima en primavera, seguida por la de verano, la de otoño y la de invierno (Fig. 4.6).

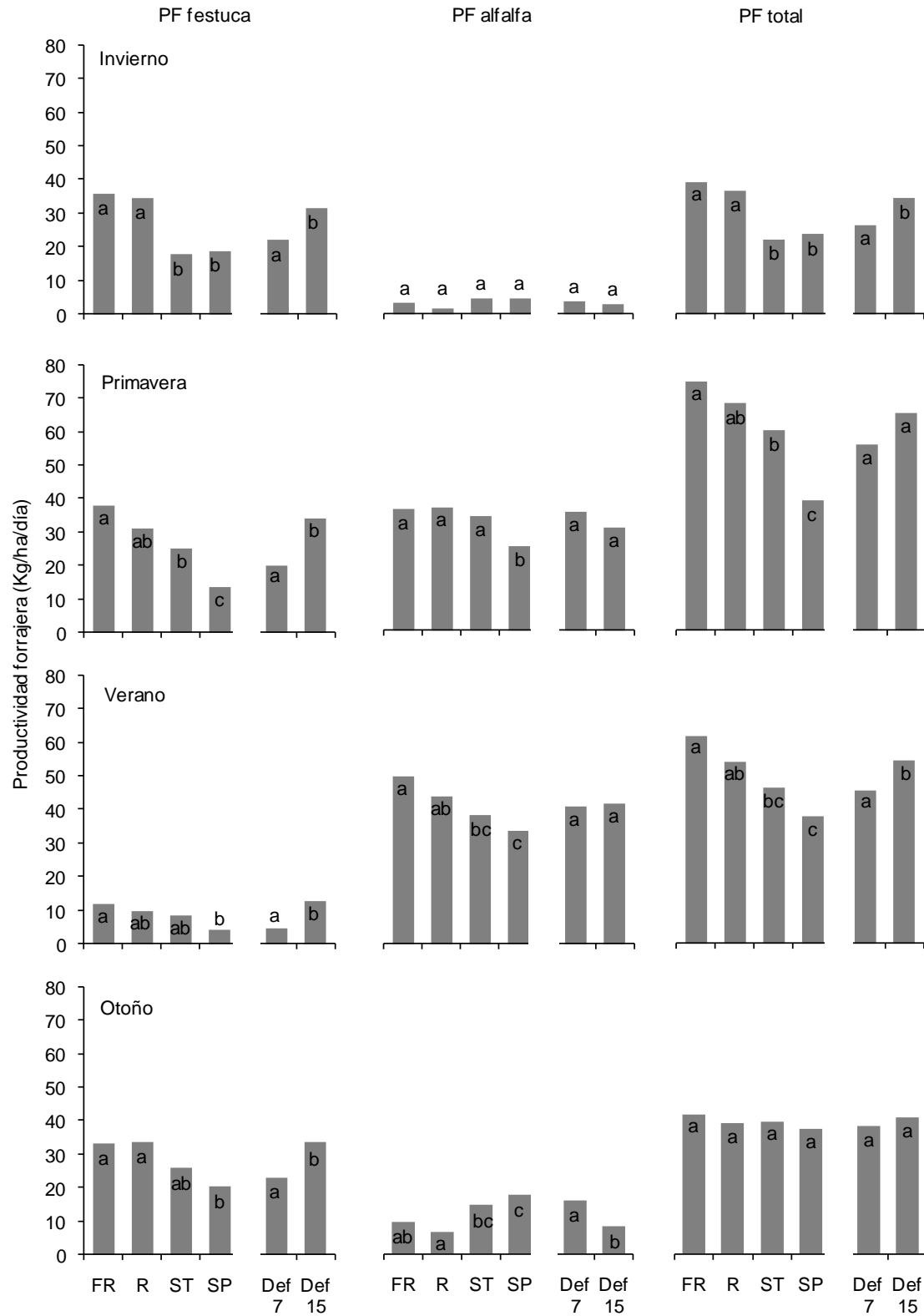


Figura 4.6. Productividad forrajera de festuca (columna izquierda), alfalfa (columna central), y total (columna derecha) para los tratamientos de disponibilidad de recursos y de defoliación, en las cuatro estaciones del año (cuatro paneles horizontales). En ningún caso la interacción entre los tratamientos de disponibilidad de

recursos y de defoliación fue significativa. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

La proporción de festuca y alfalfa en la materia seca verde varió marcadamente entre estaciones y ligeramente en respuesta a los tratamientos de defoliación y de disponibilidad de recursos (Fig. 4.7, Tabla 4.2). En invierno el porcentaje de festuca (festuca / (festuca + alfalfa)) fue 76% en promedio para todos los tratamientos, luego descendió gradualmente durante la primavera con un promedio de 56% hasta su valor mínimo de 31% en el verano, para aumentar nuevamente en el otoño a 65%. Consistentemente a lo largo de todo el año los tratamientos de defoliación leve mostraron un mayor porcentaje de festuca en la mezcla que los de defoliación severa. Entre los tratamientos de disponibilidad de recursos, en invierno, principios de primavera y principios de otoño, los tratamientos regados y regados y fertilizados mostraron un mayor porcentaje de festuca que los de sequía (Fig. 4.7 y Tabla 4.2).

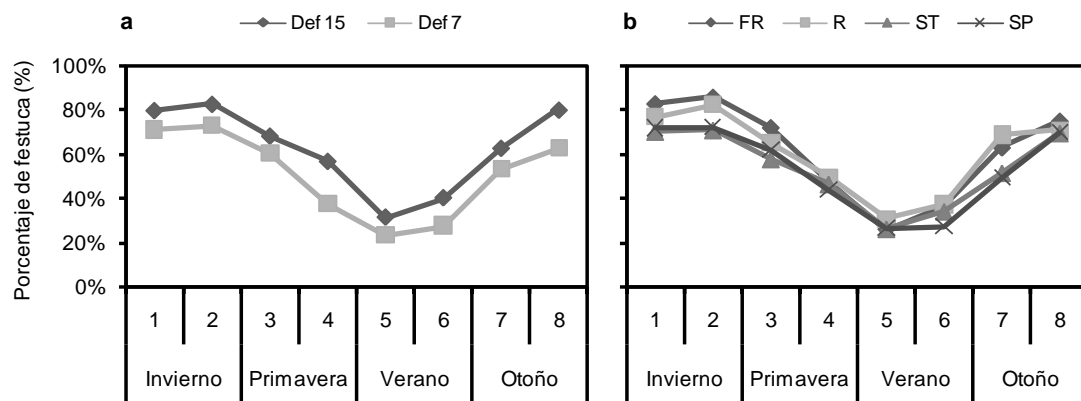


Figura 4.7. Composición de la materia seca verde total a lo largo del año, expresada como porcentaje de festuca sobre el total de la pastura (festuca / (festuca + alfalfa)), para los tratamientos de defoliación (a) y de disponibilidad de recursos (b).

		<i>Rebrote 1</i>			<i>Rebrote 2</i>		
		<i>F</i>	<i>p value</i>	<i>DMS</i>	<i>F</i>	<i>p value</i>	<i>DMS</i>
Invierno	Defoliación	11.54	0.0043	0.06	14.26	0.0020	0.06
	Ambiente	4.39	0.0225	0.08	7.65	0.0029	0.08
	Interacción	0.34	0.7966		0.55	0.6567	
		<i>Rebrote 3</i>			<i>Rebrote 4</i>		
		<i>F</i>	<i>p value</i>	<i>DMS</i>	<i>F</i>	<i>p value</i>	<i>DMS</i>
Primavera	Defoliación	6.22	0.0258	0.07	38.71	<0.0001	0.07
	Ambiente	3.43	0.0465	0.10	0.61	0.6177	
	Interacción	0.11	0.9510		1.00	0.4229	
		<i>Rebrote 5</i>			<i>Rebrote 6</i>		
		<i>F</i>	<i>p value</i>	<i>DMS</i>	<i>F</i>	<i>p value</i>	<i>DMS</i>
Verano	Defoliación	23.35	0.0003	0.04	8.01	0.0134	0.09
	Ambiente	2.02	0.1573		1.08	0.3898	
	Interacción	2.99	0.0671		0.57	0.6454	
		<i>Rebrote 7</i>			<i>Rebrote 8</i>		
		<i>F</i>	<i>p value</i>	<i>DMS</i>	<i>F</i>	<i>p value</i>	<i>DMS</i>
Otoño	Defoliación	14.57	0.0019	0.05	28.32	0.0001	0.07
	Ambiente	14.21	0.0002	0.07	0.58	0.6393	
	Interacción	2.50	0.1022		3.14	0.0590	

Tabla 4.2. ANVA de la composición de la materia seca verde total para los 8 períodos de rebrote, expresada como porcentaje de festuca sobre el total de la pastura (festuca/ (festuca + alfalfa)). Los casos con diferencias significativas están en negrita, y se presentan las diferencias mínimas significativas (DMS).

En relación al primer objetivo, sobre las variaciones de la fRFAA y la EUR, esta última se mostró relativamente estable entre estaciones del año, y respondió a la defoliación y a los tratamientos de disponibilidad de recursos, pero también mostró mayor variabilidad aparentemente no asociadas a estos factores (Fig. 4.8, Tabla 4.3). En invierno la EUR promedio para todos los tratamientos fue 1.42 gMS/MJ, en primavera-verano 1.26 gMS/MJ, y en otoño 1.38 gMS/MJ. La EUR de los tratamientos de defoliación severa fue mayor a los de defoliación leve al inicio del verano y del otoño. Entre los tratamientos de disponibilidad de recursos, dentro de un patrón variable, se diferenciaron dos grupos: los tratamientos regado y regado y fertilizado con mayor EUR y los de sequía con menor EUR. Los primeros mostraron mayor EUR en el inicio de primavera y verano, mientras que en el resto de los períodos de rebrote no se diferenciaron (Tabla 4.3).

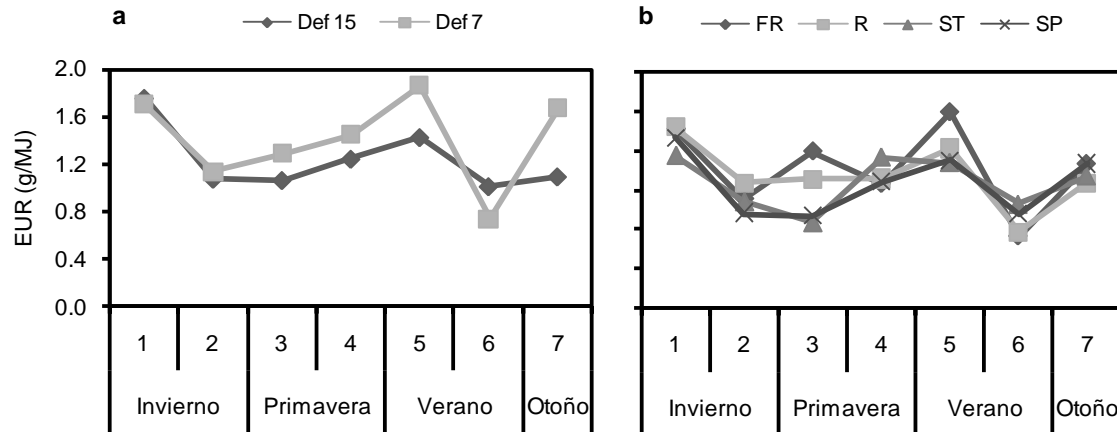


Figura 4.8. Eficiencia en el uso de la radiación de la pastura a lo largo del año para los tratamientos de defoliación (a) y de disponibilidad de recursos (b). El período de rebrote 8 (segundo rebrote del otoño) fue excluido de este análisis porque mostró elevada senescencia que interfiere en el cálculo de la EUR.

		Rebrote 1			Rebrote 2		
		F	p value	DMS	F	p value	DMS
Invierno	Defoliación	0.06	0.8049		0.22	0.6446	
	Ambiente	0.35	0.7906		0.78	0.5242	
	Interacción	1.23	0.3363		0.27	0.8438	
		Rebrote 3			Rebrote 4		
		F	p value	DMS	F	p value	DMS
Primavera	Defoliación	1.73	0.2093		2.31	0.1510	
	Ambiente	3.74	0.0366	0.53	0.86	0.4829	
	Interacción	0.66	0.5876		2.50	0.1019	
		Rebrote 5			Rebrote 6		
		F	p value	DMS	F	p value	DMS
Verano	Defoliación	8.38	0.0118	0.32	4.30	0.0570	
	Ambiente	2.45	0.1068		1.43	0.2764	
	Interacción	1.57	0.2403		0.06	0.9777	
		Rebrote 7					
		F	p value	DMS			
Otoño	Defoliación	16.15	0.0013	0.31			
	Ambiente	0.46	0.7152				
	Interacción	0.16	0.9232				

Tabla 4.3. ANVA de la eficiencia en el uso de la radiación de la pastura para los 8 períodos de rebrote. En negrita se destacan los casos en que hay diferencias significativas.

La fRFAA, por su parte, mostró aumentos muy consistentes con los tratamientos de defoliación leve y con los de mayores recursos (Fig. 4.9, Tabla 4.4). Estos contrastes entre tratamientos fueron más claros para la fRFAA que los que se mostraron previamente para la EUR. Así, bajo defoliación severa, en promedio, el 49% de la radiación fotosintéticamente activa incidente fue absorbido por el área foliar verde de la pastura, mientras que bajo defoliación leve ese valor ascendió a 69% en promedio para todos los tratamientos de disponibilidad de recursos. En invierno tanto la fertilización como el riego aumentaron la fRFAA, y en el resto de las estaciones solo el riego aumentó la fRFAA, excepto en los rebrotes del final de verano y otoño cuando no hubo diferencias. Los valores de fRFAA fueron estables a lo largo del año (Fig. 4.9).

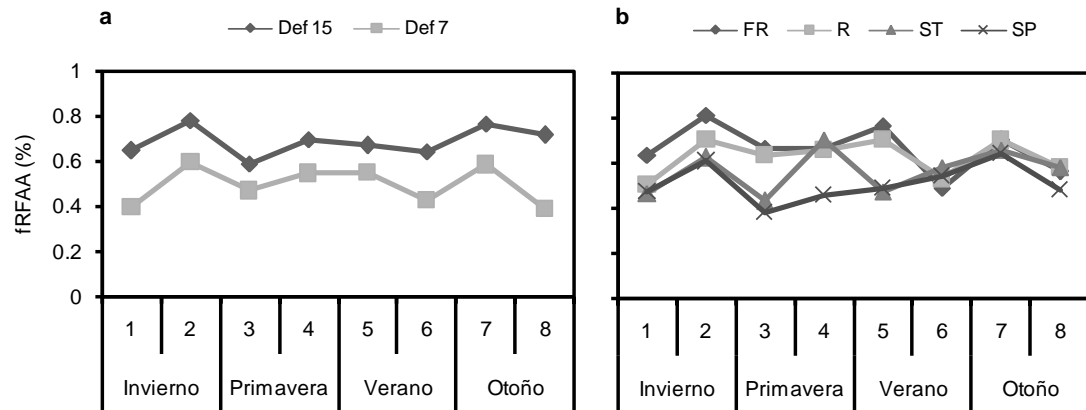


Figura 4.9. Fracción de radiación fotosintéticamente absorbida de la pastura a lo largo del año para los tratamientos de defoliación (a) y de disponibilidad de recursos (b).

		Rebrote 1			Rebrote 2		
		F	p value	DMS	F	p value	DMS
Invierno	Defoliación	139.60	<0.0001	0.05	142.37	<0.0001	0.03
	Ambiente	13.92	0.0002	0.07	37.24	<0.0001	0.05
	Interacción	0.28	0.8400		2.32	0.1199	
		Rebrote 3			Rebrote 4		
		F	p value	DMS	F	p value	DMS
Primavera	Defoliación	15.21	0.0016	0.07	82.78	<0.0001	0.04
	Ambiente	21.97	<0.0001	0.09	45.37	<0.0001	0.05
	Interacción	0.99	0.4269		8.60	0.0017	0.04
		Rebrote 5			Rebrote 6		
		F	p value	DMS	F	p value	DMS
Verano	Defoliación	43.55	<0.0001	0.04	98.89	<0.0001	0.05
	Ambiente	67.56	<0.0001	0.05	3.04	0.0644	
	Interacción	0.50	0.6890		1.28	0.3207	
		Rebrote 7			Rebrote 8		
		F	p value	DMS	F	p value	DMS
Otoño	Defoliación	156.45	<0.0001	0.03	112.16	<0.0001	0.07
	Ambiente	4.14	0.0269	0.04	2.36	0.1157	
	Interacción	1.89	0.1785		0.27	0.8461	

Tabla 4.4. ANVA de la fracción de radiación fotosintéticamente absorbida de la pastura para los 8 períodos de rebrote. En negrita se destacan los casos en que hay diferencias significativas.

Resumiendo la información presentada para EUR y fRFAA en un valor anual, y expresando las variaciones en términos relativos para hacerlas comparables, puede observarse que las variaciones de EUR entre tratamientos, si bien muestran una tendencia, fueron menores que las variaciones de fRFAA (Fig. 4.10). Además la consistencia de esas variaciones entre repeticiones del mismo tratamiento fue mucho menor para la EUR que para la fRFAA, lo cual derivó en que diferencias relativas similares fueran más significativas en el caso de la fRFAA que de la EUR (Tabla 4.5). Los tratamientos de defoliación severa mostraron mayor EUR ($p=0.0155$) y menor fRFAA

($p < 0.0001$) que los de defoliación leve. Entre los tratamientos de disponibilidad de recursos, la fRFAA fue mayor a mayores disponibilidades de agua y nutrientes ($p < 0.0001$), mientras que la EUR no difirió entre tratamientos ($p = 0.2928$).

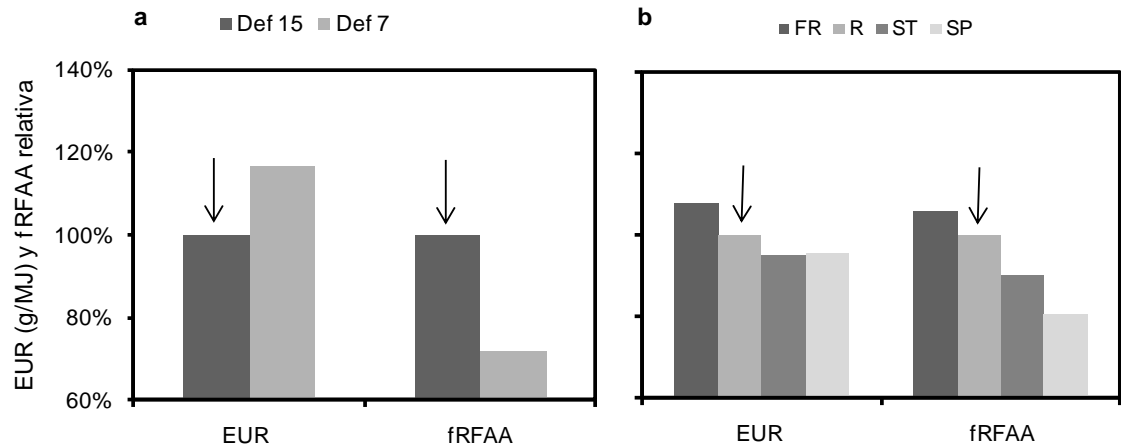


Figura 4.10. Eficiencia en el uso de la radiación y fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida anual de la pastura para los tratamientos de defoliación (a) y de disponibilidad de recursos (b). Los valores están expresados en forma relativa al tratamiento señalado con una flecha: riego (R) en (a) y defoliación leve (Def 15) en (b).

a	EUR			fRFAA		
	F	p value	DMS	F	p value	DMS
Defoliación	7.59	0.0155	0.13	537.53	<0.0001	0.02
Ambiente	1.37	0.2928		66.17	<0.0001	0.03
Interacción	1.35	0.2983		1.29	0.3061	

b	EUR	Nivel	Medias	n	
	Defoliación	Def 15	1.24	12	A
		Def 7	1.41	12	B
	Ambiente	FR	1.42	6	A
		R	1.34	6	A
		ST	1.27	6	A
		SP	1.26	6	A
fRFAA					
Defoliación	Def 15	0.69	12	A	
	Def 7	0.49	12	B	
Ambiente	FR	0.66	6	A	
	R	0.63	6		B
	ST	0.56	6		C
	SP	0.51	6		D

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

Tabla 4.5. ANVA (a) y comparación de medias (b) de la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) y de la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA) anual de la pastura para los tratamientos de disponibilidad de recursos y de defoliación. En negrita se destacan los casos en que hay diferencias significativas.

La reducción de la radiación fotosintéticamente activa incidente con tratamientos de sombreado por intervalos de aproximadamente 12 días dentro del período de rebrote disminuyó la PF en un 31%. Sin embargo, la reducción de RFAA fue más que proporcional: 54%. Ello derivó en un aumento de la EUR en los tratamientos de sombreado del 24%, que sin embargo no fue significativo (invierno: $p=0.4950$; primavera: $p=0.2601$; verano: $p=0.2164$; otoño: $p=0.0763$). Esta tendencia de la EUR a aumentar ante reducciones de la RFA incidente se observó tanto al reducir la radiación incidente artificialmente como al considerar sus reducciones estacionales (Fig. 4.11).

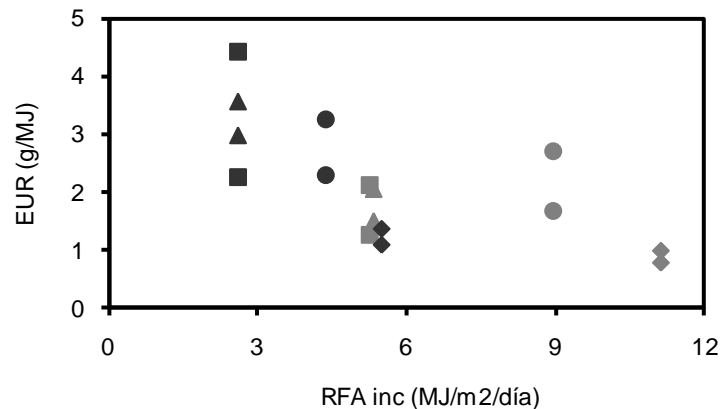


Figura 4.11. Eficiencia en el uso de la radiación para intervalos de aproximadamente 12 días durante el período de rebrote en función de la RFA incidente. Símbolos negros: tratamientos con sombreado; símbolos grises: tratamientos sin sombreado; triángulos: invierno; rombos: primavera; círculos: verano; cuadrados: otoño. Los dos símbolos para cada situación son promedios de los tratamientos de defoliación severa y leve.

En relación con el segundo objetivo, determinar el impacto de la escala temporal sobre las variaciones de EUR ante situaciones de estrés, la variabilidad de la EUR aumentó notablemente al reducirse la escala temporal de observación de estación (90 días) a período de rebrote (45 días) y a intervalo de revisita (decádico, 12 días, Fig. 4.12). Sin embargo, estimar la PF con cosechas de biomasa para períodos cada vez más cortos involucra un error de muestreo aleatorio creciente porque los incrementos de biomasa que se pretende medir son cada vez menores. Entonces el aumento de variabilidad de la EUR observado podría estar en parte asociado a este aumento de variabilidad de la PF y no solo a cambios en la EUR *per se*, que es el interés central del segundo objetivo de este capítulo. Para separar estos dos componentes se estimaron los aumentos de la variabilidad observados en la EUR que fueron debidos exclusivamente a la mayor variabilidad de PF (ver metodología). La reducción total observada de R^2 de la relación PF-RFAA entre el período estación y período decádico fue de un 56% ($R^2_{\text{estación}}=0.93$, $R^2_{\text{decádico}}=0.41$). De esta reducción la mayor variabilidad de la PF explica un 51% y los cambios en la variabilidad de la EUR *per se* el 49% restante (Tabla 4.6). Es decir, la EUR es definitivamente más variable en períodos breves que en períodos más prolongados.

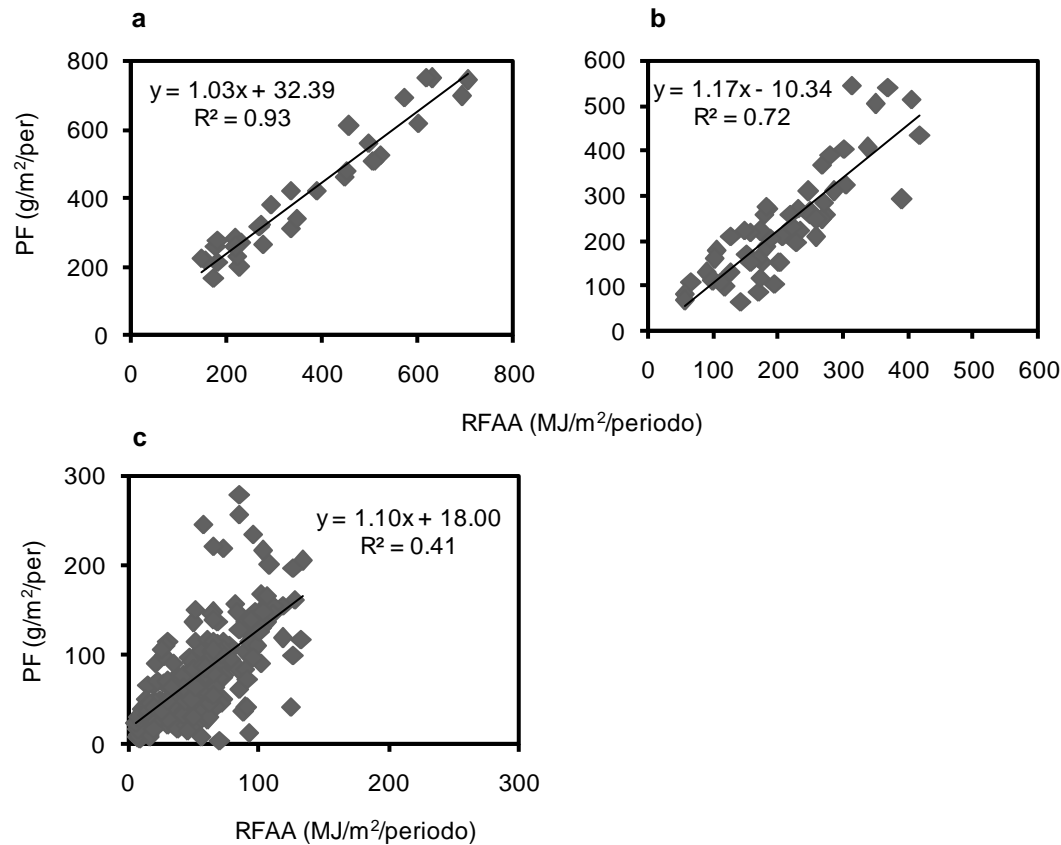


Figura 4.12. Productividad forrajera en función de la radiación fotosintéticamente activa absorbida para los tratamientos de disponibilidad de recursos y de defoliación a distintas escalas temporales: (a) estación (90 días), (b) periodo de rebrote (45 días), y (c) intervalo decádico (revisita al experimento, 12 días). La relación funcional entre productividad forrajera y radiación fotosintéticamente activa absorbida representa la eficiencia en el uso de la radiación, y la variabilidad de los datos en torno a esa relación (R^2) representa la variabilidad de la eficiencia en el uso de la radiación.

	Periodo		
	Estación	Rebrote	Decádico
Simulado	0.81	0.80	0.59
Observado	0.93	0.72	0.41

Tabla 4.6. Coeficiente de determinación simple (R^2) de la relación productividad forrajera - radiación fotosintéticamente activa absorbida para tres escalas temporales. Los valores simulados son una referencia que representa los cambios de R^2 debidos exclusivamente a aumentos de variabilidad en PF. Los valores observados son los obtenidos con los datos reales de campo. La diferencia entre ambos representa la variabilidad de la EUR *per se*.

Los tratamientos de manejo del agua impuestos, basados en riego y exclusión de precipitaciones, generaron fuertes contrastes de contenido de agua útil en el suelo (estimaciones para el perfil hasta 80cm de profundidad, Fig. 4.13). Todos los tratamientos partieron de un valor de agua útil común al comienzo de cada estación del año y luego comenzaron a separarse en función del manejo del agua: el contenido de agua útil del tratamiento regado llegó rápidamente a capacidad de campo, y el del tratamiento de sequía permanente se redujo en respuesta a la evapotranspiración y solo aumentó cuando alguna lluvia no fue interceptada por los techos de exclusión. Los tratamientos de

sequía temporal se comportaron como los de sequía permanente en el primer período de rebrote de cada estación y tendieron hacia el tratamiento de riego en el segundo período (Fig. 4.13). Los tratamientos regado y regado y fertilizado en general fueron regados con cierto exceso respecto a la demanda de agua, pero esto fue particularmente así en el segundo período de rebrote del verano (período de rebrote 6). Esta situación de exceso hídrico, que se evidenció tanto en observaciones de campo como en los resultados de percolación del balance hídrico, disminuyó la productividad y EUR de la pastura.

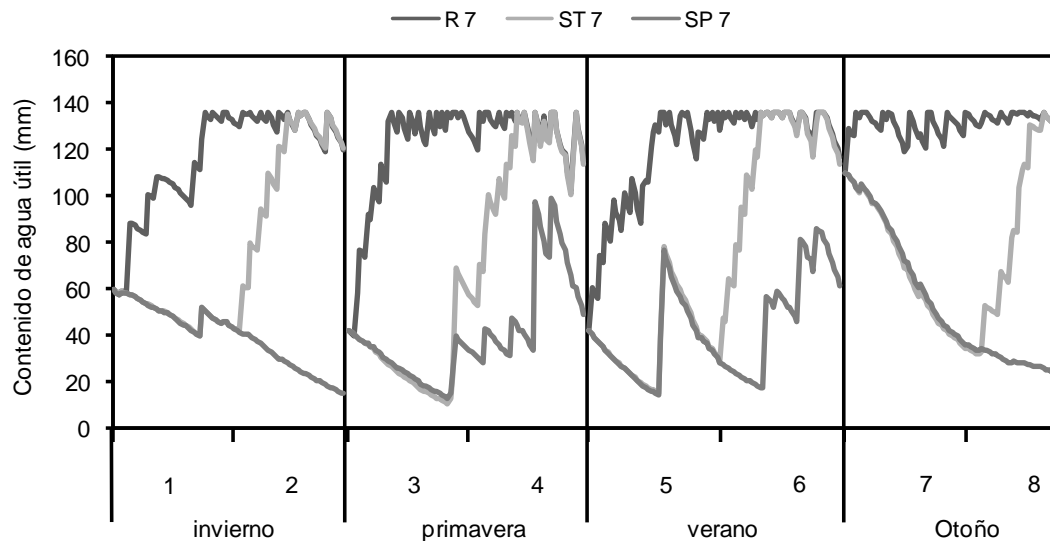


Figura 4.13. Cambios del contenido de agua útil en el suelo hasta 80 cm de profundidad a lo largo de los 8 períodos de rebrote del experimento para los tres tratamientos de manejo del agua: riego permanente (R), sequía temporal (ST), y sequía permanente (SP). Se muestran solo los tratamientos de defoliación severa (remanente a 7cm) para mayor claridad de la figura, los contrastes son muy similares para los tratamientos de defoliación leve (remanente a 15cm).

La evapotranspiración de la pastura estimada con el balance de agua fue también muy contrastante entre tratamientos y épocas del año, y explicó las variaciones de productividad en similar medida que la RFAA. Así, los coeficientes R^2 de las regresiones entre PF y evapotranspiración fueron: 0.33 para el período decádico, 0.73 para el período de rebrote, y 0.88 para el período estación. El cociente entre la evapotranspiración actual y la evapotranspiración potencial (ET/ETP), que es un indicador del estrés hídrico de la pastura, mostró también un comportamiento asociado al manejo del agua, con los tratamientos de sequía temporal comportándose como los de sequía permanente al inicio de cada estación y como los de riego al final (Fig. 4.14). Tanto el cociente ET/ETP (indicador del déficit hídrico) como la percolación (indicador del exceso hídrico) por separado no explicaron las variaciones de EUR (ET/ETP: $R^2=0.02$, $p=0.2564$; percolación: $R^2=0.08$, $p=0.0274$). Sin embargo, ambas variables combinadas en una regresión múltiple explicaron el 27% de la variabilidad de EUR ($R^2=0.27$) y el modelo fue altamente significativo con mayor estrés y mayor percolación reduciendo la EUR.

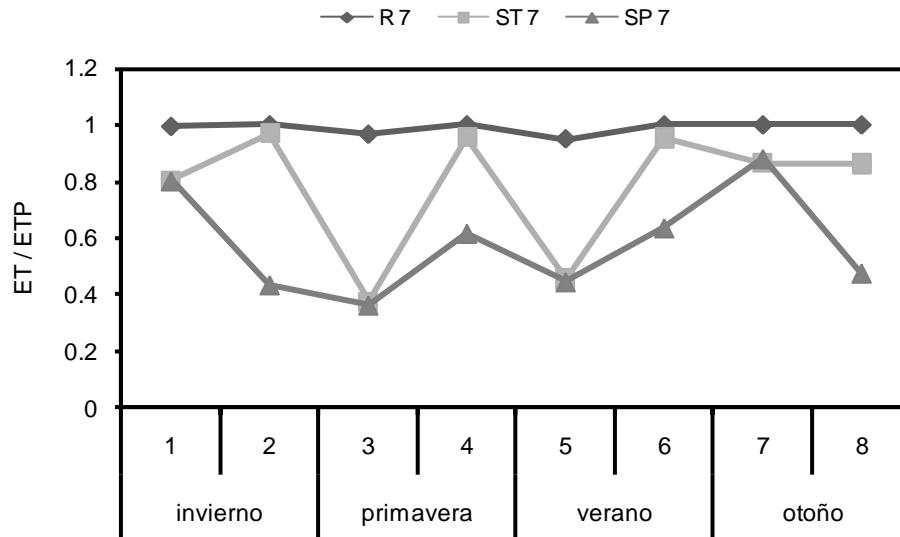


Figura 4.14. Cociente entre la evapotranspiración y la evapotranspiración potencial de la pastura a lo largo del año para los tres tratamientos de manejo del agua: riego permanente (R), sequía temporal (ST), y sequía permanente (SP). Se muestran solo los tratamientos de defoliación severa (remanente a 7cm) para mayor claridad de la figura, los contrastes son muy similares para los tratamientos de defoliación leve (remanente a 15cm).

4.4 Discusión

En este experimento conducido sobre una pastura consociada de festuca y alfalfa tanto la EUR como la fRFAA fueron afectadas por cambios de la disponibilidad de recursos y de intensidad de defoliación. La fRFAA fue más variable que la EUR. Además, la variabilidad de la EUR a lo largo del rebrote de la pastura y entre tratamientos dependió de la escala temporal de observación o cálculo. Así, para una misma pastura, la EUR fue más variable al considerar períodos de 12 días que al considerar todo el rebrote o la estación (45 y 90 días respectivamente). Por otra parte, los tratamientos de disponibilidad de recursos y de manejo de la defoliación impuestos afectaron el funcionamiento y la estructura de la pastura. La PF y la absorción de radiación fotosintéticamente activa aumentaron ante aumentos de la disponibilidad de N y P, agua, y bajo defoliación leve. La abundancia relativa de alfalfa en la mezcla forrajera fue mayor en los tratamientos con sequía. Este capítulo aporta información sobre los determinantes de la EUR en pasturas consociadas ante situaciones de déficit de recursos y cambios en el manejo que será utilizada para mejorar el desempeño de modelos ecofisiológicos utilizados en sistemas de producción ganadera de ambientes templados. A continuación se discuten (1) los cambios de la EUR y la absorción de radiación en relación a los tratamientos de disponibilidad de recursos y de defoliación impuestos y (2) el efecto de la escala temporal sobre la variabilidad de la EUR.

4.4.1 Impacto relativo de déficits de la disponibilidad de recursos y del manejo de la defoliación sobre la fRFAA y la EUR. Hipótesis asociada al primer objetivo

La defoliación severa redujo la fRFAA en un 29% en forma consistente y significativa a lo largo del año, y aumentó la EUR anual en un 17%, con variaciones

durante el año (Fig. 4.8 y 4.9). Habitualmente la defoliación reduce la productividad de las pasturas porque reduce el área foliar y, como consecuencia, la capacidad fotosintética del canopeo. Pero además luego de una defoliación severa el canopeo remanente es estructuralmente distinto: las hojas que estaban sombreadas quedan expuestas a mayor intensidad lumínica, y el canopeo rebrota con gran cantidad de hojas nuevas o jóvenes (Soussana y Oliveira Machado 2000). No está claro, en los antecedentes bibliográficos, si estos cambios modifican la EUR de la pastura o si esta continúa su crecimiento a la misma tasa por unidad de radiación interceptada. Teixeira et al. (2008) encontraron aumentos de la EUR de una pastura pura de alfalfa ante aumentos de la frecuencia de defoliación, mientras que Conant et al. (2003) no encontraron variaciones de la EUR bajo pastoreo continuo y pastoreo rotativo en pasturas consociadas de gramínea y leguminosa. El crecimiento compensatorio, definido como un aumento de la tasa de crecimiento relativa (Oesterheld y McNaughton 1991, Ferraro y Oesterheld 2002), frecuentemente observado en estudios a escala de planta individual, es un indicio de que la EUR podría aumentar ante ciertas intensidades de defoliación. En este sentido, en este trabajo la defoliación severa aumentó la tasa de crecimiento relativa en un 42%. Futuros trabajos deberían estudiar en mayor detalle la relación entre la tasa de crecimiento relativa y la EUR a escala de canopeo. Bajo defoliación severa la abundancia de alfalfa en la mezcla aumentó 20% en promedio (Fig. 4.7). Es decir que los cambios de EUR podrían responder no solo al efecto ecofisiológico discutido, sino también a la composición específica de la mezcla. Considerando que en general las leguminosas presentan menores valores de EUR (Sinoquet et al. 1990, Faurie et al. 1996) y que en este experimento las parcelas con más alfalfa (defoliación severa) tuvieron mayor EUR, el efecto ecofisiológico de la defoliación pudo haber sido mayor que el observado.

Promediando los rebrotes a lo largo del año, el estrés hídrico redujo significativamente la fRFAA en 11 y 19% bajo sequía temporaria y permanente respectivamente, pero no redujo significativamente la EUR (Fig. 4.10, tabla 4.5). En cambio, a escalas temporales más detalladas existieron ciertos períodos de estrés severo en el tratamiento de sequía permanente en los que la EUR se redujo significativamente. Collino et al. (2005) trabajando en pasturas mono-específicas de alfalfa sometidas a estrés hídrico en Córdoba, Argentina, también encontraron reducciones de la EUR solo ante condiciones de estrés muy severo, y concluyeron que la reducción de la fRFAA era la causa principal de la reducción de la PF. A escala diaria, Gastal et al. (2000) también concluyeron que el efecto principal a través del cual el déficit hídrico reduce la fotosíntesis de pasturas de festuca es la reducción de la captura de radiación por reducir el área foliar y aumentar el acartuchamiento, que puede reducir la fRFAA hasta un 50%. En ese trabajo, el cierre estomático, que sería el mecanismo por el cual se reduce la EUR, tuvo un papel secundario. La evaluación de estas respuestas ecofisiológicas al estrés es evidentemente más dificultosa en sistemas mixtos como el del experimento del presente trabajo donde los componentes de la mezcla pueden responder de manera diferente ante un estrés determinado.

El estrés por exceso hídrico también redujo la fRFAA y la EUR. Al inicio del segundo período de rebrote del verano (rebrote 6) el riego fue excesivo y generó saturación durante varios días en los tratamientos regados. La fRFAA de los tratamientos regados mostró una caída de 31% respecto del período de rebrote anterior (Fig. 4.9). Los valores de EUR de los tratamientos regados en este período fueron los menores de todo el experimento, y tuvieron una caída de 59% respecto del período de rebrote anterior (Fig. 4.8). McFarlane et al. (2003) encontraron en raygrass perenne reducciones del 30 al 70% de área foliar, del 40% de conductancia estomática y del 32% de la fotosíntesis neta,

luego de 28 días de anegamiento. Malik et al. (2001) encontraron en trigo reducciones de la fotosíntesis neta de hasta el 80% luego de anegamiento severo por 14 días. Los resultados del presente trabajo, que no fueron buscados sino que surgieron de un manejo inadecuado del riego en una secuencia de 3 a 4 semanas, adquieren relevancia considerando que condiciones de saturación o anegamiento como éstas son habituales en los sistemas de producción ganaderos, y que la información del efecto del anegamiento sobre la EUR en pasturas es muy escasa.

La mayor fertilidad generada por el agregado de N y P aumentó la fRFAA a escala anual, pero no modificó significativamente la EUR (Fig. 4.10, Tabla 4.5). La concentración foliar de N depende del estado de la planta (demanda) y del N disponible en el suelo (oferta). Ante mayor disponibilidad de N, se incrementa la tasa de elongación foliar y ello determina mayores niveles de interceptación de radiación, que es el principal mecanismo por el cual aumenta la PF de pasturas ante aumentos de la disponibilidad de N (Gastal y Durand 2000). A escala de hoja individual, aumentos de la concentración de N aumentan la fotosíntesis a intensidades de luz saturantes, pero modifican muy poco la fotosíntesis a intensidades menores de luz (Gastal y Durand 2000), como a las que la mayoría de las hojas de un canopeo cerrado están expuestas. Posiblemente por ello no se observaron diferencias de EUR en el tratamiento fertilizado. Pero es importante tener en cuenta además que no se buscó un contraste de disponibilidad de nutrientes muy marcado, ya que se pretendió representar las diferencias de fertilidad que se pueden dar de un lote a otro, por ejemplo por diferencias en las rotaciones agrícolas, en sistemas de producción. La situación no fertilizada del experimento no era deficitaria en nutrientes ya que se trataba de un lote con rotación ganadera, con niveles aceptables de materia orgánica. El hecho de que la tendencia a mayor PF en el tratamiento fertilizado no haya sido significativa en ninguna estación del año (Fig. 4.6) es también un indicio de ausencia de un contraste marcado en disponibilidad de nutrientes.

La reducción de la radiación incidente con telas media sombra estuvo asociada a aumentos de la EUR de la pastura (Fig. 4.11). La reducción de PF en las parcelas sombreadas fue de menor proporción que la reducción en intensidad lumínica, lo cual derivó en mayores valores de EUR en las condiciones de sombreado. La radiación difusa presente en días nublados o ante presencia de aerosoles tiene efectos contrapuestos sobre la fotosíntesis del canopeo: por un lado tiende a disminuirla porque reduce la RFA incidente, pero por otro tiende a aumentarla porque permite una iluminación más homogénea del canopeo en sentido vertical al alcanzar el canopeo con distintos ángulos de incidencia, reduciendo la cantidad de hojas saturadas y sub iluminadas (Sinclair et al. 1992, Greenwald et al. 2006). Esta mejor distribución de la luz en el canopeo sería la causa de los aumentos de EUR frecuentemente hallados al aumentar la proporción de radiación difusa sobre la radiación total (Turner et al. 2003, Saseendran et al. 2008). El balance neto entre ambos efectos sobre la fotosíntesis, que depende de la especie y del grado de nubosidad, determina en definitiva el efecto que las condiciones de nubosidad tendrán sobre la PF. Pero hay otras condiciones que son también afectadas por el sombreado. La modificación en el balance energético que el sombreado supone disminuye la demanda atmosférica y ello puede resultar en una disminución del consumo de agua del suelo que repercute en una mejor condición del cultivo. En este caso esa no sería una diferencia importante ya que ambos tratamientos fueron regados, y la imposición del sombreado fue por un período relativamente corto. La temperatura y las posibilidades de estrés térmico también son modificadas por las mallas media sombra. Otro factor que puede explicar en parte la respuesta observada es un cambio en la partición debido a un aumento en la utilización de reservas provenientes de las partes subterráneas de las

plantas en un período de balance de carbono negativo relativamente breve (alrededor de 10 días). Por todo esto la interpretación de resultados de experimentos de sombreo debe ser cautelosa. De todas formas, las evidencias de este experimento, que están de acuerdo con el estado de conocimiento sobre el tema (Sinclair et al. 1992, Turner et al. 2003, Greenwald et al. 2006, Saseendran et al. 2008), indican que la reducción de PF en días nublados es menos que proporcional que la reducción de radiación incidente. Como se dijo, el estudio del efecto de la intensidad y calidad lumínica sobre el crecimiento de las plantas es particularmente complejo debido fundamentalmente a las dificultades metodológicas para implementar tratamientos sin modificar otros factores determinantes del crecimiento. En este experimento el tratamiento de sombreo se incluyó con un objetivo exploratorio.

La fRFAA y la EUR de la pastura en los distintos tratamientos se mantuvieron relativamente estables a lo largo del año, es decir que no mostraron una estacionalidad marcada (Figs. 4.8 y 4.9). En relación con la fRFAA, el comportamiento observado, contrario a lo que ocurre en pastizales de la Pampa Deprimida que muestran mayor fRFAA en primavera (Posse et al. 2005, Aragón y Oesterheld 2008), podría tener dos causas. En primer lugar, el manejo de la defoliación en este experimento, que cada 45 días llevó al canopeo nuevamente a su condición inicial (simulando una carga animal variable a lo largo del año que siempre deja el canopeo en la misma condición), pudo haber homogeneizado las diferencias estacionales que se hubieran expresado en una situación de pastoreo continuo, con carga animal fija donde el consumo es mayor que la PF en invierno y menor en primavera, como es común en los pastizales de la Pampa Deprimida mencionados más arriba. La otra causa pudo haber sido la composición específica de la pastura cambiante a lo largo del año. En primavera-verano la alfalfa fue dominante y al defoliar la pastura quedaban fundamentalmente los tallos de esta especie, prácticamente sin hojas, y entonces el canopeo remanente tenía muy baja fRFAA. En los meses de otoño-invierno, en cambio, la festuca es dominante y al ser defoliada a la misma altura que la alfalfa deja una estructura más foliosa, con mayor fRFAA.

En relación con la EUR, sus valores estacionales promedio fueron 1.42 g/MJ en invierno, 1.26 g/MJ en primavera y verano, y 1.38 g/MJ en otoño. Este comportamiento se contrapone a la respuesta positiva de la EUR de alfalfa a la temperatura encontrada por Collino et al. (2005) en Argentina y por Brown et al. (2006) en Nueva Zelanda, y a la característica fisiológica de la alfalfa de asignar una parte importante de sus fotoasimilados a raíces y corona en otoño, reduciendo la EUR de la biomasa aérea. En este trabajo, la proporción cambiante de festuca y alfalfa en la pastura podría ser la causa del patrón estacional observado. En general, para gramíneas se han encontrado mayores valores de EUR que para leguminosas (Sinoquet et al. 1990, Faurie et al. 1996). Mc Call et al. (2003) proponen valores para *Lolium perenne* entre 0.9 y 1.78 g/MJ, y Duru et al. (2002) en pasturas de *Dactylis glomerata* hallaron EUR promedio de 1.1 g/MJ, con altos valores de EUR en meses invernales. Brown et al. (2006) y Teixeira et al. (2008) en pasturas de alfalfa observaron EUR entre 0.29 y 1.6 g/MJ. Si las gramíneas presentan valores de EUR algo más elevados que la alfalfa, entonces es razonable que en otoño invierno, cuando la pastura está muy enriquecida con festuca (Fig. 4.7) la EUR tienda a ser mayor, y que las diferencias entre especies no permitan ver, a escala de canopeo, la respuesta de la EUR de alfalfa a la temperatura.

Las pasturas consociadas y los pastizales naturales involucran interacciones competitivas entre las especies que en general limitan la aplicabilidad de resultados generados en sistemas monoespecíficos. Este trabajo no incluyó tratamientos de pastura

monoespecífica que serían necesarios para determinar estrictamente las interacciones, pero en cierto período del año pudo inferirse que la respuesta de una especie dependió de la presencia de la otra: la alfalfa tendió a producir más cuando la festuca lo hacía menos. Esto ocurrió en otoño, cuando los tratamientos de defoliación severa y los de sequía completa perjudicaron a la festuca y favorecieron a la alfalfa. Si bien la respuesta a la defoliación podría haber resultado en crecimiento compensatorio de parte de la alfalfa y no de la festuca, es difícil explicar la respuesta positiva de la alfalfa a la sequía por otro mecanismo que la alteración de la competencia entre las dos especies. Un problema de trabajar con pasturas consociadas es que la EUR no puede ser determinada para cada especie porque no se puede estimar la fRFAA a nivel de especie.

4.4.2 Efecto de la escala temporal sobre la variabilidad de la EUR. Hipótesis asociada al segundo objetivo

Los resultados del trabajo refuerzan la hipótesis planteada respecto de menor variabilidad de la EUR a escalas de tiempo más prolongadas. Numerosos trabajos han mencionado la necesidad de estudiar cambios de la EUR al cambiar la escala temporal en otros tipos de vegetación (Field 1991, Ruimy y Saugier 1994, Field et al. 1995, Ruimy et al. 1995, Joel et al. 1997, Medlyn et al. 2003). El experimento de este capítulo es el primero que analiza la variabilidad de la EUR a escalas variables, desde dos semanas hasta la estación (90 días) en pasturas. Observado a la escala de varias semanas o meses, el canopeo se encuentra la mayor parte del tiempo en relativo equilibrio con los recursos del ambiente (por ejemplo, tiene el área foliar que los recursos le permiten mantener), y su EUR es cercana a la EUR promedio de ese tipo de vegetación. En cambio, observado a una escala más corta, como 10 días, el canopeo se encuentra frecuentemente en cierto desequilibrio dado por la alternancia de períodos de estrés y de condiciones favorables. Por un lado, es frecuente encontrar una pastura con estrés severo durante algunos días. Por ejemplo, cuando un déficit hídrico comienza a ser severamente limitante en el canopeo se reduce la expansión y se incrementa el acorchamiento y la senescencia foliar, y en este período la EUR se reduce posiblemente por cierre estomático. Por otro lado, a esta escala reducida también es más probable que ocurran cortos períodos en que varias condiciones ambientales estén simultáneamente dentro de su rango óptimo. Por ejemplo, pueden producirse breves episodios de temperatura templada, elevada agua disponible en el suelo, cierta proporción de radiación difusa. Todo ello determinará una EUR más cercana al máximo de la especie, lo cual es claramente improbable al observar una estación completa (90 días). Así, a escala de observación semanal habrá ciertas semanas con muy alta y muy baja EUR. En cambio, a escala de períodos de rebrote completos (por ejemplo 45 días), o de varias estaciones (90 días), la EUR será más estable, alrededor de un mismo valor promedio. Esta interpretación, desarrollada a partir de los datos del experimento y de observaciones a campo, requiere ser confirmada con nuevas investigaciones. Si ello ocurre, tendrá implicancias trascendentales para el modelado de estos sistemas biológicos: es más difícil estimar la productividad con una precisión determinada en base a un modelo con EUR constante para períodos de tiempo cortos. Posiblemente por ello los modelos de simulación que operan con paso diario suelen incluir modificaciones a la EUR según la disponibilidad de recursos. Pero aun a escalas más prolongadas, el efecto de los factores ambientales sobre la EUR (detectados en ciertos casos de este experimento solo como tendencias) debería ser incluido en las estimaciones de PF en sistemas tan dinámicos como los pastizales y pasturas de climas templado.

Algunos autores, trabajando fundamentalmente en sistemas boscosos, han analizado la forma (lineal vs. curvilínea) de la relación Productividad-Radiación Absorbida a escalas temporales variables, tratando de encontrar el límite temporal en que el modelo curvilíneo observado a la escala de minutos y horas se vuelve lineal. Ruimy et al. (1995) encontraron que la relación curvilínea entre Intercambio de carbono e irradiancia a escalas de segundos o minutos, se vuelve lineal al integrar a escala diaria. En acuerdo con esto, numerosos modelos de simulación de paso diario utilizan funciones lineales. Medlyn et al. (2003), en cambio, plantean que a escalas menores a dos semanas no se debería usar un modelo lineal entre productividad y RFAA. Esa escala corresponde a la menor utilizada en este trabajo, que se mostró lineal (modelos curvilíneos no mejoraron el ajuste) aunque puede verse cierta tendencia curvilínea en los datos. Otro aspecto relevante en el análisis de la EUR a distintas escalas temporales es su valor promedio. En este experimento, las tres escalas temporales evaluadas parecen ser parte de un mismo modelo general entre PF y RFAA, es decir que la EUR calculada a estas tres distintas escalas es relativamente constante (Fig. 4.15).

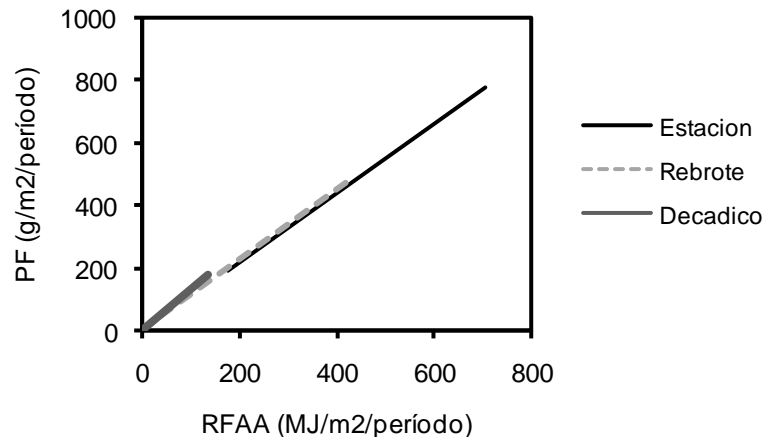


Figura 4.15. Modelo de regresión ajustado entre la productividad forrajera y la radiación fotosintéticamente activa absorbida para las tres escalas temporales analizadas.

4.4.3 Implicancias

Este capítulo presenta información novedosa sobre ecofisiología de pasturas que será utilizada para mejorar modelos de estimación de la productividad forrajera de las pasturas que actualmente se utilizan en forma operativa. En general, se refuerza el valor de la fRFAA como variable explicativa de las variaciones de la PF ante cambios en la disponibilidad de recursos y el manejo. La EUR varió más con el manejo (aumentó con la defoliación severa) que con las variaciones ambientales (donde mostró tendencias a ser menor ante déficit hídricos). La interacción de la variabilidad de la EUR con la escala temporal fue marcada: a escalas de pocos días la variabilidad fue mucho mayor. Se plantea la necesidad de mejorar las estimaciones a campo de PF, posiblemente utilizando métodos alométricos que no sean destructivos, para poder conducir nuevos experimentos con mayor nivel de detalle temporal. Este capítulo intenta constituir un nexo entre la investigación básica que en él se presenta y la herramienta aplicada que con él se pretende mejorar.

CAPÍTULO 5. Discusión General

Esta tesis propone que los sistemas de producción ganaderos necesitan afrontar un cambio de manejo que tenga como elemento central el uso información cuantitativa de productividad forrajera (PF) para la toma de decisiones. Sobre la base de esta premisa se generó un sistema de seguimiento de la PF y se facilitó su adopción por parte de productores de un grupo piloto. Actualmente los productores agropecuarios y sus asesores cuentan con un sistema capaz de estimar mes a mes la PF de sus lotes para una serie temporal de aproximadamente diez años. Esto implica un cambio cualitativo de disponibilidad de información, representa una oportunidad para tomar mejores decisiones de manejo, y concientiza sobre el uso del forraje para maximizar su crecimiento. Adicionalmente, la base de datos de PF generada, extraordinariamente amplía en su cobertura espacial y temporal, será de utilidad para trabajos de investigación sobre los patrones espacio-temporales de PF. El sistema de seguimiento aquí presentado es una primera aproximación para resolver la necesidad de los productores de contar con información de PF en forma extensiva.

Luego del planteo inicial del sistema de seguimiento forrajero surgió la necesidad de generar nuevos conocimientos que permitieran mejorar aspectos críticos de su base conceptual y funcionamiento. Así, en primer lugar se enfocó en la relación entre la información espectral derivada de sensores remotos y variables ecofisiológicas relevantes para estimar la PF. Luego se determinó el impacto de las condiciones ambientales y del manejo de la defoliación sobre la interceptación de radiación y la eficiencia en el uso de esa radiación interceptada (EUR). Por último, se avanzó en un aspecto menos estudiado: el impacto de la escala temporal sobre la variabilidad de la EUR.

En el Capítulo 2 se desarrolló un sistema de seguimiento que estima mensualmente la PF a nivel de lote, y distribuye la información a los asesores y productores que la utilizan como una herramienta de manejo. El sistema se basó en el marco conceptual de la eficiencia en el uso de la radiación (EUR, Monteith 1972, Running et al. 2004, Burba y Verma 2005), el índice de vegetación normalizado del sensor MODIS (IVN, Huete et al. 2002), y la interacción con grupos de productores. El modelo de la EUR permitió combinar información de teledetección de las pasturas con mediciones detalladas a campo de PF para generar calibraciones para cada tipo de recurso forrajero, avalando la hipótesis planteada en relación al primer objetivo del Capítulo. Además, la resolución espacial de 250 m de las imágenes de IVN del sensor MODIS resultó superadora de la relación de compromiso entre resolución espacial y temporal presente en sensores utilizados anteriormente, permitiendo seguir individualmente pequeñas áreas (Justice et al. 2002). Finalmente, la organización de productores en grupos con un mismo asesor facilitó el intercambio de información y la comunicación en un proyecto cuyo objetivo fue generar una herramienta de manejo. Una encuesta realizada sobre la utilización del sistema ratificó la idea inicialmente planteada de que es necesario que los usuarios finales manejen un marco de referencia agronómico robusto para que sean capaces de incorporar información de PF en sus esquemas de toma de decisiones. Como resultado, los sistemas de producción ganaderos cuentan actualmente con una herramienta que permite un esquema de manejo más racional, tanto en relación al análisis del ciclo de producción pasado como a la planificación forrajera.

En el Capítulo 3 se caracterizó la utilidad de la información espectral del sensor MODIS para realizar un seguimiento de la absorción de radiación por parte de canopeos

con distintos niveles de cobertura. Se encontró que las variaciones observadas de los índices de vegetación calculados a partir de información espectral del sensor MODIS explicaron entre 90 y 94% de las variaciones de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (fRFAA) medida a campo en forma directa con una barra de interceptación en cultivos de trigo. Tal como había sido planteado en las predicciones del Capítulo, el índice de vegetación mejorado (IVM, Huete et al. 2002) presentó una relación con la fRFAA más lineal que el IVN, posiblemente debido a la menor saturación del IVM ante aumentos del área foliar (Le Roux et al. 1997, Fensholt 2004, Xiao et al. 2005, Glenn et al. 2008, Jiang et al. 2008). Las imágenes satelitales provenientes de compuestos temporales más cortos (8 vs. 16 días) no mostraron una mejora en la precisión de las estimaciones de fRFAA. Se logró comparar información proveniente de escalas espaciales contrastantes, píxeles de 5.3 ha vs. mediciones puntuales a campo, planificando el trabajo de campo en función de la resolución espacio-temporal del sensor y la fenología del cultivo (Turner et al. 2005).

En el Capítulo 4 se determinó el efecto de los estreses ambientales principales en pasturas y pastizales sobre las variaciones de la EUR. En un experimento conducido sobre una pastura consociada de festuca y alfalfa, la EUR fue menos variable que la fRFAA ante cambios de la disponibilidad de recursos y de intensidad de defoliación. Además, la variabilidad de la EUR a lo largo del rebrote de la pastura y entre tratamientos dependió de la escala temporal de observación o cálculo. Así, para una misma pastura, la EUR fue más variable al considerar períodos de 12 días que al considerar todo el rebrote o la estación (45 y 90 días respectivamente). Ambos hallazgos aportan evidencias a favor de las hipótesis planteadas inicialmente en el Capítulo. Por otra parte, los tratamientos de disponibilidad de recursos y de manejo de la defoliación impuestos afectaron el funcionamiento y la estructura de la pastura. La PF y la absorción de radiación fotosintéticamente activa aumentaron ante aumentos de la disponibilidad de N y P, agua, y bajo defoliación leve. La abundancia relativa de alfalfa en la mezcla forrajera fue mayor en los tratamientos con sequía. En definitiva, los resultados de este Capítulo refuerzan la idea de que es razonable estimar la PF a partir de las variaciones en RFAA, pero que es necesario refinar la precisión de las estimaciones conociendo las variaciones de EUR.

5.1 Mejoras al sistema de seguimiento forrajero

Como se dijo más arriba, en el Capítulo 2 de esta tesis se generó un sistema de seguimiento de la PF y en los Capítulos 3 y 4 se obtuvo información para mejorarlo. ¿Cómo cambia entonces el sistema planteado inicialmente a la luz de los hallazgos del resto de la tesis? Los resultados del Capítulo 3 mostraron la conveniencia de derivar la fRFAA a partir del índice de vegetación IVM respecto del IVN utilizado en el Capítulo 2 en el sistema original. El IVM mostró una relación más lineal con la fRFAA, tal como se preveía a partir del análisis de la literatura (Le Roux et al. 1997, Fensholt 2004, Xiao et al. 2005, Glenn et al. 2008, Jiang et al. 2008). Una consecuencia ventajosa clave de esta linealidad del IVM es que el valor de un píxel particular presenta una proporcionalidad directa con la fracción de la superficie del píxel ocupada por distintas condiciones de la vegetación (Jiang et al. 2006). Es decir que, por ejemplo, un píxel que presenta el 75% de su superficie con suelo desnudo con IVM de 0.3 y un 25% con vegetación verde y vigorosa con IVM de 0.7, tendrá un valor de IVM representativo de esa situación ($IVM_{\text{píxel}} \approx 0.3 \cdot 0.75 + 0.7 \cdot 0.25$), mientras que el IVN en píxeles heterogéneos sobrevalora en su resultado la proporción de superficie con altos valores del índice (Jiang et al. 2006). Esta cuestión de la proporcionalidad, si bien no fue evaluada en la tesis, es central para la

aplicación del sistema de seguimiento forrajero en sistemas de producción que utilizan pastoreo rotativo, en los que un píxel está compuesto por franjas de utilización diferencial con vegetación en distinta condición. Por otra parte, la evidencia generada indica que los compuestos temporales de imágenes de 16 días utilizados inicialmente son más convenientes que los de 8 días. Posiblemente ello esté asociado a la mayor probabilidad de obtener imágenes de alta calidad en períodos de 16 días, es decir, libres de nubosidad y con menores ángulos de inclinación del sensor (más cercanos al cenit, Huete et al. 2002, Justice et al. 2002, Fensholt et al. 2004, Tan et al. 2006).

En el capítulo 4, por su parte, se confirmó la importancia de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA) como determinante principal de la PF. Es decir que conociendo la RFAA es posible derivar la PF en la mayoría de las situaciones, tal como se supuso en el Capítulo 2 para diseñar el sistema de seguimiento. Sin embargo, las variaciones de la EUR deberían ser tenidas en cuenta para obtener estimaciones de PF más precisas. Así, el Capítulo 4 pone de manifiesto la importancia de los hallazgos del Capítulo 3 para modificar el Capítulo 2. Esto es, al determinar en el Capítulo 4 que la RFAA es la variable principal para determinar la PF con el modelo del Capítulo 2, se pone de manifiesto la importancia de generar una estimación confiable de la RFAA (variable determinante de la RFAA) a partir de la información espectral, que fue el objetivo principal del Capítulo 3.

La EUR no se mostró estable ante variaciones de ciertos factores ambientales y de manejo (Capítulo 4). Estos factores, como el déficit hídrico, la condición nitrogenada, la proporción de radiación difusa y la defoliación, tienen que ser tomados en cuenta para estimar la EUR y así caracterizar la PF de forma más precisa. Pero además, como se dijo, estos cambios de la EUR dependieron de la escala temporal: los ajustes a la EUR serían más relevantes cuando se realizan estimaciones de PF para períodos cortos, es decir estimaciones diarias o semanales, que cuando se estima la PF mensual o anual. Una forma habitual de corregir el valor de la EUR en modelos de paso diario es mediante el uso de coeficientes que reduzcan el valor de la EUR observada en condiciones óptimas de acuerdo al grado de limitación impuesto por un recurso o condición particular (Fig. 5.1, Jones et al. 1998, Running et al. 2004). El valor que toma la EUR en el campo es la resultante de todas las limitaciones actuando de manera combinada, lo cual puede dificultar el análisis de la respuesta de la EUR a un factor en particular en experimentos que no controlan todas las variables. Por ejemplo, en el experimento conducido en el Capítulo 4 no se observó una reducción de la EUR en los meses de invierno, pero sin embargo no sería correcto concluir que la temperatura no afecta la EUR, ya que otros factores pueden haber compensado el efecto de la temperatura en la comparación entre estaciones. Un punto importante de esta aproximación para estimar la EUR es la interacción de los distintos coeficientes propuestos. Una alternativa es que sean multiplicativos, otra es que se utilice solo el más limitante, aquel que da el menor valor de EUR. En el primer caso se supone que la restricción es por más de un factor, en el segundo, que estos no se combinan.

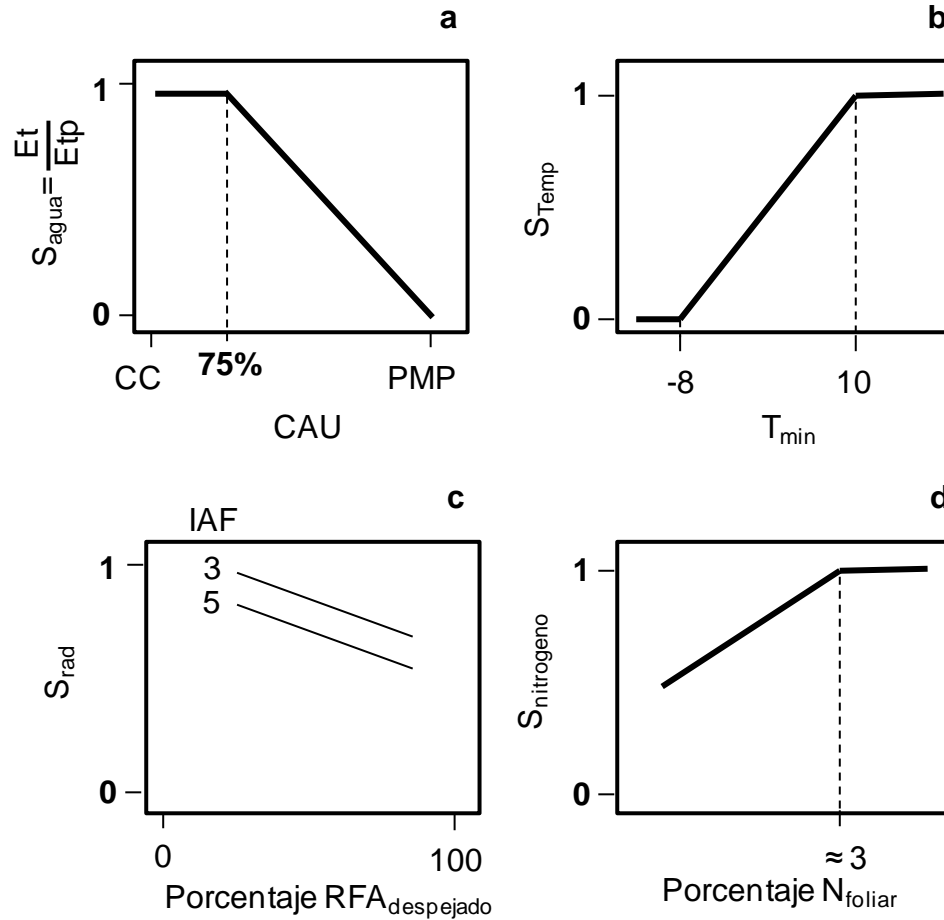


Figura 5.1. Representación esquemática de posibles funciones de control de la EUR óptima. S, coeficiente que toma valores entre 0 y 1 de acuerdo al nivel de limitación impuesto por el factor en cuestión y reduce proporcionalmente el valor de la EUR. Futuros trabajos deberían trabajar en la parametrización detallada de estas y otras funciones de control de la EUR. (a) S_{agua} , es el coeficiente de estrés hídrico, que se calcula como el cociente entre la Et real del cultivo y la Etp para el día en cuestión. El valor del coeficiente depende del contenido de agua útil en el suelo (CAU), en la medida que el suelo se seca y se acerca al punto de marchitez permanente (PMP), la Et se reduce respecto de la Etp y el coeficiente es cada vez menor. El valor umbral indicado en 75% es aproximado depende del tipo de suelo. (b) S_{temp} es el coeficiente de temperatura mínima. Temperaturas mínimas diarias menores a 10°C comienzan a ser limitantes para la fotosíntesis en muchas especies de climas templados. Eventualmente, en días muy fríos el coeficiente toma valor cero, truncando la PF del día. (c) S_{rad} es el coeficiente de radiación difusa. En días con mayor nivel de radiación difusa, es decir menor porcentaje de RFA respecto de la condición de día despejado, el coeficiente toma valores mayores. A su vez para canopeos con menor IAF el coeficiente toma valores mayores. (d) $S_{\text{nitrogeno}}$ es el coeficiente de condición nitrogenada. Debajo de un valor umbral de 2.7-3% de N foliar, el coeficiente comienza a reducirse.

5.2 El área foliar y la fRFAA

Según los resultados del Capítulo 4, en los que se observó mayor EUR en el tratamiento de defoliación severa, resultaría apropiado considerar el área foliar de la pastura para corregir la EUR del sistema de seguimiento forrajero. Este aumento de la EUR bajo defoliación severa es una respuesta esperable a la luz del crecimiento compensatorio frecuentemente mostrado luego de eventos de defoliación (Oosterheld y McNaughton 1991, Ferraro y Oosterheld 2002). Pero por otro lado, considerando que en

un canopeo con menor área foliar una proporción mayor de hojas se encuentran bajo saturación lumínica (*i.e.* recibiendo niveles de radiación mayores de los que permiten fotosíntesis máxima), sería esperable que el tratamiento de defoliación severa tuviera menor EUR (Parsons y Penning 1988, Peri et al. 2003). Posiblemente la saturación lumínica del canopeo sometido a defoliación severa no haya sido tal debido a que rápidamente, a los pocos días de la defoliación, el canopeo ya se encontraba con niveles de área foliar que mitigaban la saturación. En la literatura sobre ecofisiología de pasturas el índice de área foliar (IAF) óptimo ha sido definido como el que maximiza el crecimiento de la pastura (Schwinning y Parsons 1999). Por debajo del IAF óptimo el crecimiento del canopeo está limitada por superficie foliar, mientras que por encima del IAF óptimo lo está por la actividad fotosintética en descenso de las hojas más viejas, el sombreado y los costos de mantenimiento de un canopeo que tiene cada vez más tejido inactivo. El resultado es una curva de acumulación de biomasa aérea sigmoidea a lo largo del rebrote de una pastura, lo que implica una curva de tasa de crecimiento de óptimo (Parsons et al. 1983a, Parsons et al. 1983b, Parsons y Penning 1988). Sin embargo, visto desde la perspectiva del modelo de Monteith, el aumento del IAF por arriba del óptimo mantiene máximos valores de $fRFAA$ y, si la EUR no cambia, máximos niveles de PF. Esto explicaría los resultados encontrados sobre menores valores de EUR en los tratamientos de defoliación menos intensos, ya que en ellos el canopeo pasaba más tiempo con IAF mayor al óptimo. Así, estos resultados compatibilizan los conceptos provenientes de ambas aproximaciones: los trabajos de ecofisiología tradicionales y el modelo de la EUR. Para incluir operativamente esta corrección por nivel de área foliar en el sistema de seguimiento se podría utilizar directamente la $fRFAA$ como un estimador del nivel de área foliar de la pastura. Aún más, habría que incluir en el coeficiente los días con $fRFAA > 95\%$ como un factor de reducción de la EUR.

En el Capítulo 4 se generó un algoritmo para corregir las lecturas de $fRFAA$ que contenían material muerto en pie ($fRFAA_{\text{verde+seco}}$). El algoritmo se basó en la observación a campo de la distribución vertical del material muerto y verde. Es importante notar que este algoritmo, que involucra cierta complejidad de cálculo, es en realidad una corrección que modifica los valores de $fRFAA_{\text{verde+seco}}$ en menor medida que la multiplicación directa por el porcentaje de verde. Específicamente la corrección va desde cero cuando todo el canopeo es verde hasta multiplicar a $fRFAA_{\text{verde+seco}}$ por el porcentaje de material verde en la situación en que la cantidad de material verde sea mínima (canopeo de baja altura) y entonces el material muerto esté entremezclado con el material verde en el mismo estrato del canopeo. Toda vez que el material muerto se encuentre presente en un canopeo con mayores valores de material verde que ese valor mínimo, la corrección modificará en menor medida el valor medido de $fRFAA_{\text{verde+seco}}$ bajo el supuesto de que el material muerto se encuentra preferentemente en estratos bajos del canopeo que tienen menor incidencia en la interceptación de la radiación incidente. La corrección fue evaluada con mediciones independientes de reflectancia a la luz de los resultados del Capítulo 3.

La estimación a campo de la $fRFAA$ con barras de interceptación de radiación no resulta sencilla, como queda claro a partir de la necesidad de realizar correcciones a las lecturas, debido fundamentalmente a la presencia de material muerto. Existe una aparente contradicción en el uso de la barra de interceptación para estimar $fRFAA$ en el Capítulo 3, donde se plantea que no debería ser el método de referencia, y el Capítulo 4, donde se la vuelve a utilizar y se genera un método de corrección. Sin embargo las críticas al método en el Capítulo 3 se concentraron en el hecho de que cuando el cultivo de trigo avanza en su madurez luego de floración las hojas aún consideradas verdes van perdiendo funcionalidad (García et al. 1988, Miralles y Slafer 1997, Kemanian et al. 2004)

y pasan de un color verde a una palidez gradual hasta la senescencia. Esta situación no es capturada por la barra que continúa registrando interceptación por esas hojas como si estuvieran totalmente verdes. Esta situación, sin embargo, no se da en las pasturas sometidas a un régimen de pastoreo como el representado en el experimento del Capítulo 4, donde la defoliación total de las parcelas cada 45 días previene este envejecimiento del canopeo. Esta es una cuestión relevante porque su falta de percepción puede derivar en estimaciones sesgadas de EUR. En efecto, trabajos en cultivos que utilizan la barra de interceptación como método de referencia estimarán máxima interceptación después de floración y esta pérdida de funcionalidad gradual de las hojas será canalizada como una reducción de EUR (reducción del crecimiento aún a altos niveles de interceptación). En cambio, si en esos mismos trabajos se utilizara un método espectral, sensible directamente a las características ópticas del canopeo, en las etapas post floración las estimaciones de fRFAA indicarían una reducción de interceptación por esa senescencia incipiente del canopeo, y sería esa la causa de la reducción posiblemente observada en la tasa de crecimiento (sin canalizar tales reducciones como una menor EUR). Se necesitan más trabajos que comparen la base conceptual de ambos métodos de estimación de la fRFAA.

Así, a través de los distintos muestreos y experimentos realizados, la variable fRFAA se constituyó en una variable central de la tesis por su base mecánica y utilidad práctica. En primer lugar, por su rol como descriptora del estado actual del canopeo, que encierra conceptos estructurales como funcionales ya que informa sobre el nivel de área foliar/inclinación, a la vez que determina la PF futura. En segundo lugar por la posibilidad de derivar su valor a partir de imágenes satelitales con una aproximación mecánica basada en el comportamiento espectral del canopeo, que potencia críticamente su utilidad al poder obtener un valor de alta calidad por lote cada 15 días. Y por último por constituir en sí misma una herramienta de capacitación y extensión, al concientizar a quienes manejan los sistemas de producción sobre la importancia del área foliar remanente como determinante de la PF futura.

5.3 El estrés hídrico y la eficiencia en el uso del agua

El estrés hídrico es el determinante más importante de la PF de las pasturas y pastizales en muchas regiones del mundo (Saseendran et al. 2008) y en particular en gran parte de la pampa húmeda (Deregibus 2000, Dardanelli et al. 2002). La condición hídrica de la pastura depende de la precipitación, la demanda atmosférica, el nivel de área foliar de la pastura, y la capacidad de almacenaje del suelo (Kremer y Running 1996, Allen et al. 1998, Panigrahi y Panda 2003). La respuesta de la productividad forrajera al estrés hídrico es un elemento central de todos los capítulos de esta tesis. En el Capítulo 2 se generaron calibraciones que incluyeron datos de PF de un año con sequía intensa (2003), que redujo marcadamente la fRFAA, evidenciada por el IVN de las imágenes satelitales, y finalmente la PF. En el Capítulo 3 se muestrearon lotes de trigo dispersos por el centro de la provincia de Buenos Aires, con distintas fechas de siembra y profundidad a la tosca, intentando abarcar distintas situaciones reales que incluyeran lotes con estrés hídrico reduciendo la expansión foliar. En general, por las condiciones de los ciclos en los que se realizó el trabajo no se incluyeron lotes con estrés marcado. Por último, en el Capítulo 4 la sequía fue el tratamiento manipulativo central sobre el que se concentraron los mayores esfuerzos, y se logró imponer el nivel de estrés buscado, con efectos sobre la PF y la EUR. La parametrización de un modelo de balance hídrico permitió describir la situación de cada tratamiento a lo largo del experimento marcando

momentos de estrés por déficit y por exceso hídrico. La información generada en esta tesis indica que en general la PF de las pasturas de la Pampa Húmeda disminuye por déficit hídrico que afecta principalmente la absorción de radiación incidente, probablemente debido a la reducción de la expansión foliar, el acartuchamiento y la senescencia acelerada (Saseendran et al. 2008). Las reducciones de la EUR, que también ocurren, son de menor importancia relativa y pueden ser percibidas principalmente cuando se analizan períodos de tiempo cortos, de días a semanas.

La eficiencia en el uso del agua (EUA), calculada como los gramos de materia seca producidos por milímetro de agua evapotranspirados (Dardanelli et al., Stöckle et al. 2008), explicó las variaciones de PF con igual o mayor precisión que la radiación absorbida. Este resultado, que como se dijo más arriba es indicativo del rol limitante del agua en estos sistemas de producción, pone de relevancia la potencialidad de la EUA como una forma alternativa de calcular la PF. Sin embargo, surge el interrogante de si el poder explicativo de la evapotranspiración se mantendrá en situaciones de estrés hídrico menor al obtenido en el experimento donde se manipuló la disponibilidad de agua para la pastura. Otra posibilidad sería combinar la información aportada por ambas variables, la EUR y la EUA, en un modelo dual que calcule la PF con ambas eficiencias y utilice el resultado menor suponiendo que representa al valor más limitante (Stöckle et al. 2003, Stöckle et al. 2008). De esta forma no sería necesario el coeficiente de estrés hídrico para reducir la EUR propuesto más arriba, ya que en los casos donde el estrés esté presente el cálculo por EUA dará un menor valor de PF y será el resultado utilizado. Esta metodología debería ser evaluada en futuros trabajos.

5.4 Extrapolabilidad de las calibraciones de EUR

El sistema de seguimiento está basado en calibraciones empíricas entre la PF y la RFAA para calcular la EUR. La EUR depende del tipo de vegetación e incluso de la especie (Ruimy et al. 1995, Sinclair y Muchow 1999). Pero una misma especie en ambientes contrastantes podrá también mostrar EUR diferente (Sinclair y Muchow 1999). Por ello se requieren calibraciones de PF-RFAA para cada combinación de mezcla forrajera-ambiente. Es decir que la posibilidad de extrapolar calibraciones empíricas de la EUR como las utilizadas en el sistema de seguimiento del Capítulo 2 es limitada. De hecho los valores de EUR estimados en esta tesis para pasturas de loma del Sudoeste Bonaerense (Capítulo 2) fueron de alrededor de la mitad que los estimados para pasturas del Norte de la provincia (Capítulo 4). Futuros trabajos deberían generar una red de ensayos en los que se caracterice con una metodología uniforme, en cada uno de ellos, la EUR de parcelas con un gradiente de mezclas desde leguminosa pura hasta gramínea pura, pasando, por ejemplo, por cuatro mezclas con composición variable. Cada ensayo debería ser conducido simultáneamente en alrededor de cinco localidades, seleccionadas por sus contrastes en tipo de suelo, temperatura y precipitación. Los resultados de esta red, analizados en el contexto del estrés sufrido por las pasturas en cada localidad, y contextualizados a la luz de los resultados de esta tesis, aportarían información suficiente para generar una base de EUR que permita luego hacer estimaciones de PF para la región pampeana sin necesidad de recurrir a calibraciones locales.

En el experimento del Capítulo 4 se generó información para mejorar nuestra comprensión de la variabilidad de la relación entre PF y RFAA, es decir, la variabilidad de las calibraciones. Así, se buscó reducir el empirismo del sistema de seguimiento conociendo las bases mecánicas que tienen mayor impacto sobre la EUR en estos

sistemas. Sin embargo, así como los resultados de una calibración particular no son extrapolables a pasturas de otras regiones (Reeves et al. 2001, Hill et al. 2004), los resultados del experimento tampoco logran reemplazar totalmente a las calibraciones empíricas. Esto se debe fundamentalmente a la variabilidad en EUR que muestran diferentes especies y mezclas forrajeras, y por la interacción de esos genotipos con el ambiente. Esta tesis incluye un primer paso hacia la estimación de la PF sin la necesidad de recurrir a calibraciones locales.

5.5 La radiación difusa

Uno de los resultados del experimento del Capítulo 4 fue que los tratamientos de sombreo mostraron una tendencia a aumentar la EUR de la pastura. Es decir que por unidad de radiación absorbida, la pastura mostró mayor crecimiento cuando esa radiación tenía mayor proporción de radiación difusa. La explicación de esa tendencia debe ser interpretada con cautela ya que los tratamientos de sombreo modifican también otras variables, como la temperatura. De todas formas, estos resultados, que están en línea con el conocimiento actual sobre el tema (Sinclair et al. 1992, Peri et al. 2002, Turner et al. 2003, Greenwald et al. 2006, Saseendran et al. 2008), indicarían la necesidad de corregir la EUR por la proporción de radiación difusa. Una propuesta inicial para hacerlo sería calcular el cociente entre la RFA del día y la RFA esperable para esa latitud y momento del año sin nubosidad. Ese cociente debería ser calibrado con estimaciones de EUR diarias o de unos pocos días.

5.6 Futuros pasos

En esta tesis se generó un sistema de seguimiento forrajero y luego se investigaron las variables consideradas principales para mejorarlo. Sin embargo, una parte importante del valor del trabajo radica en las preguntas que quedan abiertas y que darán paso a futuras investigaciones. Estas preguntas pueden ser agrupadas entre cuestiones metodológicas-ecofisiológicas y de adopción-impacto de la tecnología.

5.6.1 Cuestiones metodológicas - ecofisiológicas

El cálculo de la PF a partir de cortes de biomasa, si bien es tomado como método de referencia, presenta ciertas limitaciones que pueden dar como resultado alta variabilidad en las determinaciones (Biondini et al. 1991, Sala y Austin 2000). Por un lado es un método laborioso y destructivo. Por ello, la superficie a cosechar para las determinaciones suele ser reducida, lo cual sumado al hecho de tomar la biomasa inicial y final en sitios contiguos, lleva a que las estimaciones no sean muy precisas. Ello es particularmente así cuando el incremento de biomasa entre las dos cosechas sucesivas es bajo, debido a una baja PF real o a intervalos entre defoliaciones cortos (Sala y Austin 2000). Cuando se calcula la EUR con datos de PF con elevada variabilidad (entre repeticiones) se obtienen resultados también variables. Así, la potencia para detectar diferencias significativas entre tratamientos se ve reducida. En el experimento del Capítulo 4 la ausencia de diferencias significativas entre los valores de EUR anuales parecería ser un ejemplo de la situación descripta. Entre las aplicaciones que requieren estimaciones detalladas y precisas de la PF está la determinación del efecto de la radiación difusa sobre la EUR. Para ello se necesita conducir experimentos en los que se pueda estimar la

PF en plazos cortos, por ejemplo, para períodos de 4-5 días con eventos reales de nubosidad o sombreados artificiales. Trabajar sobre nuevas alternativas de estimación de la PF, o en la adaptación de metodologías que se usan para otras situaciones (como intercambio de carbono en estudios fisiológicos, o torres de *eddy covariance* en estudios a escala de ecosistema) a experimentos a campo a escala de parcelas experimentales, tendría entonces un alto impacto metodológico.

Existe una gran cantidad de datos publicados sobre EUR en distintos sistemas, naturales y agrícolas, que deben ser utilizados como antecedentes para contextualizar los resultados de nuevos experimentos. Sin embargo una de las mayores dificultades para hacerlo es la falta de objetividad o de una manera estandarizada de caracterizar el estrés de la vegetación durante el período de estimación de la EUR. Es decir, se necesita un índice de estrés objetivo, y fundamentalmente, utilizar el mismo índice en distintos trabajos para capitalizar el conocimiento existente. En este sentido, un trabajo de revisión de las publicaciones existentes, clasificándolas por tipo de vegetación y caracterizando el estrés en todos los trabajos con el mismo índice sería un aporte significativo a esta problemática. Entre varias maneras posibles de determinar el estrés, el cociente entre la evapotranspiración real y la potencial (ET/ETP), usada en esta tesis, es una alternativa válida que ya ha sido utilizada también en otros trabajos (Saseendran et al. 2008).

5.6.2 *Transferencia, adopción e impacto del sistema*

Uno de los objetivos principales del sistema de seguimiento forrajero es que se constituya en una herramienta de manejo de sistemas de producción ganaderos. Para ello es necesario trabajar sobre la adopción de la tecnología por los usuarios finales de manera permanente en el tiempo (Campbell y Stafford Smith 2000, Seelan et al. 2003, Cros et al. 2004). A lo largo de esta tesis se trabajó en ese sentido: se realizaron más de treinta reuniones de extensión con el objetivo de explicar las bases del sistema a los usuarios finales y ejemplificar posibles aplicaciones, algunas de ellas generadas por los propios usuarios. También se realizó una encuesta que permitió focalizar el trabajo subsiguiente. Los futuros esfuerzos deberían organizarse a partir de un diagnóstico inicial de la situación que responda claramente preguntas generales como: ¿Cuánto se usa el sistema? ¿Cuáles son las limitantes principales para que se use más? ¿Qué características tienen los casos de elevado nivel de adopción? Las respuestas a éstas (y otras) preguntas deberían ordenar las prioridades de trabajo en torno a tres grandes tipos de limitaciones: comunicacionales, es decir problemas asociados al tiempo y forma de distribución de la información; de precisión, es decir problemas asociados al funcionamiento del sistema que determinen que para ciertas situaciones (tipos de recursos, momentos del año, situaciones de manejo, presencia de estrese, etc.) la precisión obtenida sea menor que la necesaria; y conceptuales, en el sentido de trabas en los usuarios para incorporar información de PF en su esquema de toma de decisiones de manejo. Un diagnóstico claro de la situación permitirá canalizar los esfuerzos eficientemente. Desde el punto de vista de la adopción de la tecnología poco serviría por ejemplo continuar realizando experimentos para mejorar la predicción de la EUR en condiciones de estrés si la limitación principal al uso fuera que los usuarios tienen serias dificultades para manejar el formato de planilla de cálculo que contiene la información.

Un claro desafío pendiente es intentar determinar el impacto productivo y económico del sistema de seguimiento sobre los sistemas de producción que lo utilizan. Para hacerlo debería primero definirse la aproximación a seguir, los supuestos a utilizar, el grupo de usuarios sobre el que trabajar. El desafío es complejo ya que se trata de

evaluar la diferencia en el resultado productivo por haber contado con un mayor nivel de información. Posiblemente sería conveniente determinar primero las decisiones que se basaron en el sistema de seguimiento, y asignarles luego un valor en términos físicos y económicos. Una aproximación alternativa y complementaria sería, en lugar de trabajar sobre casos reales hacerlo sobre un esquema teórico de toma de decisiones (Bert et al. 2006). Así, se pueden identificar con claridad los puntos críticos modificados por contar con esta información adicional y estimar la probabilidad de obtener beneficios de esta tecnología. Este ejercicio podría constituirse en una herramienta efectiva para facilitar la adopción del sistema por nuevos usuarios.

5.7 Comentarios finales

El crecimiento sostenido de la población mundial generará cada vez mayor demanda de alimentos, lo cual determina que los sistemas de producción deberán aumentar la eficiencia de producción. Se plantea entonces un escenario general más competitivo en el que la incorporación de tecnología será una de las herramientas clave para avanzar hacia sistemas de producción sustentables. En la región pampeana Argentina, los sistemas de producción ganaderos ya se encuentran en una situación de competencia con la agricultura que incrementa la presión para obtener resultados satisfactorios. En este contexto, el sistema de seguimiento forrajero constituye una pieza de información clave para incorporar un esquema de manejo más racional. Además, este sistema es un ejemplo claro de utilización de conocimiento científico para mejorar la productividad y generar beneficios a los sectores de la producción.

6 BIBLIOGRAFIA

- Agnusdei, M., S. Assuero, F. Lattanzi, y M. Marino. 2010. Critical N concentration can vary with growth conditions in forage grasses: implications for plant N status assessment and N deficiency diagnosis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **88**:215-230.
- Agnusdei, M. G., M. R. Colabelli, y R. C. Fernández Grecco. 2001. Crecimiento estacional de forraje de pasturas y pastizales naturales para el sudeste bonaerense. INTA, Boletín Técnico N° 152. Balcarce.
- Akmal, M., y M. J. J. Janssens. 2004. Productivity and light use efficiency of perennial ryegrass with contrasting water and nitrogen supplies. *Field Crops Research* **88**:143-155.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, y M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO, Rome.
- Almeyra, A. C., P. Corradi, G. Eleicegui, y T. Zorraquin. 2003. Agroalimentos Argentinos. AACREA, Buenos Aires.
- Aragón, R., y M. Oesterheld. 2008. Linking vegetation heterogeneity and functional attributes of temperate grasslands through remote sensing. *Applied Vegetation Science* **11**:117-130.
- Arkebauer, T. J., A. Weiss, T. R. Sinclair, y A. Blum. 1994. In defense of radiation use efficiency: a response to Demetriades-Shah et al. (1992). *Agricultural and Forest Meteorology* **68**:221-227.
- Belanger, G., Richards, y E. J. 1997. Growth analysis of timothy grown with varying N nutrition. Agricultural Institute of Canada, Ottawa, ON, CANADA.
- Belanger, G., F. Gastal, y G. Lemaire. 1992. Growth analysis of a tall fescue sward fertilized with different rates of nitrogen. Crop Science Society of America, Madison, WI, ETATS-UNIS.
- Belanger, G., F. Gastal, y F. R. Warembourg. 1994. Carbon Balance of Tall Fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.): Effects of Nitrogen Fertilization and the Growing Season. *Annals of Botany* **74**:653-659.
- Bert, F. E., E. H. Satorre, F. R. Toranzo, y G. P. Podesta. 2006. Climatic information and decision-making in maize crop production systems of the Argentinean Pampas. *Agricultural systems* **88**:180-204.
- Biondini, M., W. Launroth, y O. Sala. 1991. Correcting estimates of net primary production: Are we overestimating plant production in rangelands? *Journal of Range Management* **33**:194-198.
- Bondeau, A., D. W. Kicklighter, y J. Kaduk. 1999. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): importance of vegetation structure on seasonal NPP estimates. *Global Change Biology* **5**:35-45.
- Bouwman, A., K. Van der Hoek, B. Eickhout, y I. Soenario. 2005. Exploring changes in world ruminant production systems. *Agricultural systems* **84**:121-153.
- Bradford, J. B., J. A. Hicke, y W. K. Lauenroth. 2005. The relative importance of light-use efficiency modifications from environmental conditions and cultivation for estimation of large-scale net primary productivity. *Remote Sensing of Environment* **96**:246-255.
- Brown, H. E., D. J. Moot, y E. I. Teixeira. 2006. Radiation use efficiency and biomass partitioning of lucerne (*Medicago sativa*) in a temperate climate. *European Journal of Agronomy* **25**:319-327.
- Burba, G. G., y S. B. Verma. 2005. Seasonal and interannual variability in evapotranspiration of native tallgrass prairie and cultivated wheat ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology* **135**:190-201.
- Campbell, B. D., y D. M. Stafford Smith. 2000. A synthesis of recent global change research on pasture and rangeland production: reduced uncertainties and their management implications. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **82**:39-55.
- Chapin, F. S., III, A. J. Bloom, C. B. Field, y R. H. Waring. 1987. Plant responses to multiple environmental factors. *Bioscience* **37**:49-57.
- Chapin III, F. S., P. A. Matson, y H. A. Mooney. 2002. Carbon Input to Terrestrial Ecosystems. Páginas 97-122 *en* Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer-Verlag, New York.

- Cheng, Y., J. A. Gamon, D. A. Fuentes, Z. Mao, D. A. Sims, H. Qiu, H. Claudio, A. Huete, y A. F. Rahman. 2006. A multi-scale analysis of dynamic optical signals in a Southern California chaparral ecosystem: A comparison of field, AVIRIS and MODIS data. *Remote Sensing of Environment* **103**:369-378.
- Cherney, J. H., y V. G. Allen. 1995. Forages in a Livestock System. Páginas 175-188 en R. Barnes, D. Miller, y C. Nelson, editores. *Forages*. Iowa State University Press, Ames, Iowa.
- Choudhury, B. J. 2000. A sensitivity analysis of the radiation use efficiency for gross photosynthesis and net carbon accumulation by wheat. *Agricultural and Forest Meteorology* **101**:217-234.
- Collino, D. J., J. L. Dardanelli, M. J. De Luca, y R. W. Racca. 2005. Temperature and water availability effects on radiation and water use efficiencies in alfalfa (*medicago sativa* L.). *Australian Journal of Experimental Agriculture* **45**:383-390.
- Conant, R., G. D. Johnson, y G. Brann. 2003. Seasonality of grazing impacts on light-use-efficiency and APAR in southeastern pastureland: implications for remote sensing of ANPP. en 30th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Honolulu, HI.
- Corson, M. S., R. H. Skinner, y C. A. Rotz. 2006. Modification of the SPUR rangeland model to simulate species composition and pasture productivity in humid temperate regions. *Agricultural systems* **87**:169-191.
- Cros, M. J., M. Duru, F. Garcia, y R. Martin-Clouaire. 2004. Simulating management strategies: the rotational grazing example. *Agricultural systems* **80**:23-42.
- Dardanelli, J., D. Collino, M. E. Otegui, y V. O. Sadras. 2002. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. Páginas 377-439 en E. H. Satorre, R. L. Benech, G. A. Slafer, E. B. De la Fuente, D. J. Miralles, M. E. Otegui, y R. Savin, editores. *Producción de granos : bases funcionales para su manejo*. Editorial Facultad de Agronomía, UBA, Buenos Aires.
- Daughtry, C. S. T., K. P. Gallo, S. N. Goward, S. D. Prince, y W. P. Kustas. 1992. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. *Remote Sensing of Environment* **39**:141-152.
- Demetriades-Shah, T. H., M. Fuchs, E. T. Kanemasu, y I. Flitcroft. 1992. A note of caution concerning the relationship between cumulated intercepted solar radiation and crop growth. *Agricultural and Forest Meteorology* **58**:193-207.
- Demetriades-Shah, T. H., M. Fuchs, E. T. Kanemasu, y I. D. Flitcroft. 1994. Further discussions on the relationship between cumulated intercepted solar radiation and crop growth. *Agricultural and Forest Meteorology* **68**:231-242.
- Deregibus, V. A. 2000. Argentina humid's grazing lands. Páginas 395-405 en G. Lemaire, J. Hodgson, A. Moraes, P. C. d. F. Cavalho, y C. Nabinger, editores. *Grassland ecophysiology and grazing ecology*. CABI, New York.
- Dewar, R. C., B. E. Medlyn, y R. E. McMurtrie. 1998. A mechanistic analysis of light and carbon use efficiencies. *Plant, Cell and Environment* **21**:573-588.
- Di Bella, C., R. Faivre, F. Ruget, y B. Seguin. 2005. Using VEGETATION satellite data and the crop model STICS-Prairie to estimate pasture production at the national level in France. *Physics and Chemistry of the Earth* **30**:3-9.
- Di Bella, C. M., J. M. Paruelo, J. E. Becerra, C. Bacour, y F. Baret. 2004. Effect of senescent leaves on NDVI-based estimates of fAPAR: experimental and modelling evidences. *International Journal of Remote Sensing* **25**:5415-5427.
- Diaz-Solis, H., M. M. Kothmann, W. E. Grant, y R. De Luna-Villarreal. 2006a. Application of a simple ecological sustainability simulator (SESS) as a management tool in the semi-arid rangelands of northeastern Mexico. *Agricultural systems* **88**:514-527.
- Diaz-Solis, H., M. M. Kothmann, W. E. Grant, y R. De Luna-Villarreal. 2006b. Use of irrigated pastures in semi-arid grazinglands: A dynamic model for stocking rate decisions. *Agricultural systems* **88**:316-331.
- Diaz-Solis, H., M. M. Kothmann, W. T. Hamilton, y W. E. Grant. 2003. A simple ecological sustainability simulator (SESS) for stocking rate management on semi-arid grazinglands. *Agricultural systems* **76**:655-680.
- Didan, K., y A. Huete. 2006. MODIS Vegetation Index Product Series Collection 5 Change Summary. Arizona.

- Donnelly, J. R., M. Freer, L. Salmon, A. D. Moore, R. J. Simpson, H. Dove, y T. P. Bolger. 2002. Evolution of the GRAZPLAN decision support tools and adoption by the grazing industry in temperate Australia. *Agricultural systems* **74**:115-119.
- Duru, M., H. Ducrocq, C. Fabre, y E. Feuillerac. 2002. Modeling Net Herbage Accumulation of an Orchardgrass Sward. *Agronomy Journal* **94**:1244-1256.
- Epstein, H. E., W. K. Lauenroth, I. C. Burke, y D. P. Coffin. 1997. Productivity patterns of C3 and C4 functional types in the US Great Plains. *Ecology* **78**:722-731.
- Faurie, O., J. F. Soussana, y H. Sinoquet. 1996. Radiation Interception, Partitioning and Use in Grass -Clover Mixtures. *Annals of Botany* **77**:35-46.
- Fensholt, R. 2004. Earth observation of vegetation status in the Sahelian and Sudanian West Africa: comparison of Terra MODIS and NOAA AVHRR satellite data. *International Journal of Remote Sensing* **25**:1641-1659.
- Fensholt, R., I. Sandholt, y M. S. Rasmussen. 2004. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment* **91**:490-507.
- Ferraro, D. O., y M. Oesterheld. 2002. The effect of defoliation on grass growth. A quantitative review. *Oikos* **98**:125-133.
- Field, C. B. 1991. Ecological scaling of carbon gain to stress and resource availability. Páginas 35-65 *en* H. A. Mooney, W. E. Winner, y E. J. Pell, editores. *Integrated Responses of Plants to Stress*. Academic Press, San Diego.
- Field, C. B., J. T. Randerson, y C. M. Malmstrom. 1995. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment* **51**:74-88.
- Frame, J., y P. Newbould. 1986. Agronomy of hite clover. *Advances in Agronomy* **40**:1-88.
- Gallo, K. P., C. S. T. Daughtry, y M. E. Bauer. 1985. Spectral estimation of absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. *Remote Sensing of Environment* **17**:221-232.
- Garcia, R., E. T. Kanemasu, B. L. Blad, A. Bauer, D. J. Hatfield, D. J. Major, R. J. Reginato, y K. G. Hubbard. 1988. Interception and use efficiency of light in winter wheat under different nitrogen regimes. *Agricultural and Forest Meteorology* **44**:175-186.
- Gastal, F., y J. L. Durand. 2000. Effects of nitrogen and water supply on N and C fluxes and partitioning in defoliated swards. Páginas 15-39 *en* G. Lemaire, J. Hodgson, A. Moraes, P. C. d. F. Cavalho, y C. Nabinger, editores. *Grassland ecophysiology and grazing ecology*. CABI, New York.
- Gastal, F., y G. Lemaire. 2002. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany* **53**:789-799.
- Gitelson, A. A. 2004. Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Crop Biophysical Characteristics. *Journal of Plant Physiology* **161**:165-173.
- Gitelson, A. A., B. D. Wardlow, G. P. Keydan, y B. Leavitt. 2007. An evaluation of MODIS 250-m data for green LAI estimation in crops. *Geophysical Research Letters* **34**.
- Glenn, E. P., A. R. Huete, P. L. Nagler, y S. G. Nelson. 2008. Relationship Between Remotely-sensed Vegetation Indices, Canopy Attributes and Plant Physiological Processes: What Vegetation Indices Can and Cannot Tell Us About the Landscape. *Sensors* **8**:2136-2160.
- Gower, S. T., C. J. Kucharik, y J. M. Norman. 1999. Direct and Indirect Estimation of Leaf Area Index, fAPAR, and Net Primary Production of Terrestrial Ecosystems. *Remote Sensing of Environment* **70**:29-51.
- Greenwald, R., M. H. Bergin, J. Xu, D. Cohan, G. Hoogenboom, y W. L. Chameides. 2006. The influence of aerosols on crop production: A study using the CERES crop model. *Agricultural systems* **89**:390-413.
- Hall, A. J., D. J. Connor, y V. O. Sadras. 1995. Radiation-use efficiency of sunflower crops: effects of specific leaf nitrogen and ontogeny. *Field Crops Research* **41**:65-77.
- Hanan, N. P., S. D. Prince, y A. Begue. 1995. Estimation of absorbed photosynthetically active radiation and vegetation net production efficiency using satellite data. *Agricultural and Forest Meteorology* **76**:259-276.

- Heinsch, F. A., M. Reeves, P. Votava, S. Kang, C. Milesi, M. Zhao, J. Glassy, W. M. Jolly, R. Loehman, C. F. Bowker, J. S. Kimball, R. R. Nemani, y S. W. Running. 2003. User's Guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products NASA MODIS Land Algorithm.
- Hill, M. J., G. E. Donald, M. W. Hyder, y R. C. G. Smith. 2004. Estimation of pasture growth rate in the south west of Western Australia from AVHRR NDVI and climate data. *Remote Sensing of Environment* **93**:528-545.
- Hirata, M., N. Koga, H. Shinjo, H. Fujita, G. Gintzburger, J. Ishida, y A. Miyazaki. 2005. Measurement of above-ground plant biomass, forage availability and grazing impact by combining satellite image processing and field survey in a dry area of north-eastern Syria. *Grass and Forage Science* **60**:25-33.
- Huete, A. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* **25**:295-309.
- Huete, A., K. Didan, T. Miura, E. P. Rodriguez, X. Gao, y L. G. Ferreira. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* **83**:195-213.
- Huete, A. R., K. Didan, Y. E. Shimabukuro, P. Ratana, S. R. Saleska, L. R. Hutya, W. Yang, R. R. Nemani, y R. Myneni. 2006. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophysical Research Letters* **33**.
- Irving, B., P. Rutledge, A. Bailey, M. Naeth, y D. Chanasyk. 1995. Grass utilization and grazing distribution within intensively managed fields in Central Alberta. *Journal of Range Management* **48**:358-361.
- Jiang, Z., A. R. Huete, J. Chen, Y. Chen, J. Li, G. Yan, y X. Zhang. 2006. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment* **101**:366-378.
- Jiang, Z., A. R. Huete, K. Didan, y T. Miura. 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band *Remote Sensing of Environment* **110**:3833-3845
- Jobbagy, E. G., O. E. Sala, y J. M. Paruelo. 2002. Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: a remote sensing approach. *Ecology* **83**:307-319.
- Jochec, K. G., J. W. Mjelde, A. C. Lee, y J. R. Conner. 2001. Use of Seasonal Climate Forecasts in Rangeland-Based Livestock Operations in West Texas. *Journal of Applied Meteorology* **40**:1629-1639.
- Joel, G., J. A. Gamon, y C. B. Field. 1997. Production efficiency in sunflower: The role of water and nitrogen stress. *Remote Sensing of Environment* **62**:176-188.
- Johnson, I. R., y J. H. M. Thornley. 1983. Vegetative crop growth model incorporating leaf area expansion and senescence, and applied to grass. *Plant, Cell and Environment* **6**:721-729.
- Johnson, I. R., y J. H. M. Thornley. 1985. Dynamic model of the response of a vegetative grass crop to light, temperature and nitrogen. *Plant, Cell and Environment* **8**:485-499.
- Jonckheere, I., S. Fleck, K. Nackaerts, B. Muys, P. Coppin, M. Weiss, y F. Baret. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* **121**:19-35.
- Jones, J., G. Tsuji, G. Hoogenboom, L. Hunt, P. Thornton, P. Wilkens, D. Imamura, W. Bowen, y U. Singh. 1998. Decision support system for agrotechnology transfer. Páginas 157-177 *en* G. Tsuji, G. Hoogenboom, y P. Thornton, editores. *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Justice, C. O., J. R. G. Townshend, E. F. Vermote, E. Masuoka, R. E. Wolfe, N. Saleous, D. P. Roy, y J. T. Morisette. 2002. An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment* **83**:3-15.
- Kaine, G., y P. Tozer. 2005. Stability, resilience and sustainability in pasture-based grazing systems. *Agricultural systems* **83**:27-48.
- Keating, B. A., y R. L. McCown. 2001. Advances in farming systems analysis and intervention. *Agricultural systems* **70**:555-579.
- Kemanian, A. R., C. O. Stockle, y D. R. Huggins. 2004. Variability of Barley Radiation-Use Efficiency. *Crop Science* **44**:1662-1672.
- Kiniry, J. R. 1994. A note of caution concerning the paper by Demetriades-Shah et al. (1992). *Agricultural and Forest Meteorology* **68**:229-230.

- Kremer, R. G., y S. W. Running. 1996. Simulating seasonal soil water balance in contrasting semi-arid vegetation communities. *Ecological Modelling* **84**:151-162.
- Lauenroth, W., A. Wade, M. Williamson, B. Ross, S. Kumar, y D. Cariveau. 2006. Uncertainty in Calculations of Net Primary Production for Grasslands. *Ecosystems* **9**:843.
- Lauenroth, W. K., y O. E. Sala. 1992. Long-term forage production of North American shortgrass steppe. *Ecological applications* **2**:397-403.
- Le Roux, X., H. Gauthier, A. Begue, y H. Sinoquet. 1997. Radiation absorption and use by humid savanna grassland: assessment using remote sensing and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology* **85**:117-132.
- Ledgard, S. F., y K. W. Steele. 1992. Biological nitrogen fixation in mixed legume/grass pastures. *Plant and Soil* **141**:137-153.
- Lemaire, G., y M. Agnusdei. 2000. Leaf tissue turn-over and efficiency of herbage utilization. Páginas 265-288 en G. Lemaire, J. Hodgson, A. de Moraes, C. Nabinger, y P. C. de F. Cavalho, editores. *Grassland Ecophysiology and Grazing Ecology*. CABI Publishing.
- Lemaire, G., y D. Chapman. 1996. Tissue flows in grazed plant communities. en J. Hodgson y A. W. Illius, editores. *The ecology and management of grazing systems*. Cab International.
- Long, S., E. Garcia Moya, S. Imbamba, A. Kamnalrut, M. Piedade, J. Scurlock, Y. Shen, y D. Hall. 1989. Primary productivity of natural grass ecosystems of the tropics: A reappraisal. *Plant and Soil* **115**:155-166.
- Los, S. O., G. J. Collatz, P. J. Sellers, C. M. Malmstrom, N. H. Pollack, R. S. DeFries, L. Bounoua, M. T. Parris, C. J. Tucker, y D. A. Dazlich. 2000. A Global 9-yr Biophysical Land Surface Dataset from NOAA AVHRR Data. *Journal of Hydrometeorology* **1**:183-199.
- Malik, A. I., T. D. Colmer, H. Lambers, y M. Schortemeyer. 2001. Changes in physiological and morphological traits of roots and shoots of wheat in response to different depths of waterlogging. *Functional Plant Biology* **28**:1121-1131.
- Manly, B. 1997. *Randomization, Bootstrap and Monte Carlo Methods in Biology*, 2^{da} edición. Chapman & Hall, London.
- McCall, D. G., y G. J. Bishop-Hurley. 2003. A pasture growth model for use in a whole-farm dairy production model. *Agricultural systems* **76**:1183-1205.
- McCree, K. j. 1972. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agricultural Meteorology* **10**:442-453.
- McFarlane, N. M., T. A. Ciavarella, y K. F. Smith. 2003. The effects of waterlogging on growth, photosynthesis and biomass allocation in perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) genotypes with contrasting root development. *The Journal of Agricultural Science* **141**:241-248.
- McNaughton, S. J., D. G. Milchunas, y D. A. Frank. 1996. How can net primary productivity be measured in grazing ecosystems? *Ecology* **77**:974-977.
- Medlyn, B. E. 1998. Physiological basis of the light use efficiency model. *Tree Physiology* **18**:167-176.
- Medlyn, B. E., D. Barrett, J. Landsberg, P. Sands, y R. Clement. 2003. Conversion of canopy intercepted radiation to photosynthate: review of modelling approaches for regional scales. *Functional Plant Biology* **30**:153-169.
- Miralles, D. J., y G. A. Slafer. 1997. Radiation interception and radiation use efficiency of near-isogenic wheat lines with different height. *Euphytica* **97**:201-208.
- Miura, T., H. Yoshioka, K. Fujiwara, y H. Yamamoto. 2008. Inter-Comparison of ASTER and MODIS Surface Reflectance and Vegetation Index Products for Synergistic Applications to Natural Resource Monitoring. *Sensors* **8**:2480-2499.
- Monteith, J. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology* **9**:747-766.
- Monteith, J. L. 1994. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. *Agricultural and Forest Meteorology* **68**:213-220.
- Moore, A. D., J. R. Donnelly, y M. Freer. 1997. GRAZPLAN: Decision support systems for Australian grazing enterprises. III. Pasture growth and soil moisture submodels, and the GrassGro DSS. *Agricultural systems* **55**:535-582.
- Muchow, R. C. 1985. An analysis of the effects of water deficits on grain legumes grown in a semi-arid tropical environment in terms of radiation interception and its efficiency of use. *Field Crops Research* **11**:309-323.

- Myneni, R. B., S. Hoffman, Y. Knyazikhin, J. L. Privette, J. Glassy, Y. Tian, Y. Wang, X. Song, Y. Zhang, y G. R. Smith. 2002. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment* **83**:214-231.
- Nagler, P. L., E. P. Glenn, T. Lewis Thompson, y A. Huete. 2004. Leaf area index and normalized difference vegetation index as predictors of canopy characteristics and light interception by riparian species on the Lower Colorado River. *Agricultural and Forest Meteorology* **125**:1-17.
- Ni, J. 2004. Estimating net primary productivity of grasslands from field biomass measurements in temperate northern China. *Plant Ecology* **174**:217-234.
- Nouvellon, Y., D. L. Seen, S. Rambal, A. Begue, M. S. Moran, Y. Kerr, y J. Qi. 2000. Time Course of Radiation Use Efficiency in a Shortgrass Ecosystem: Consequences for Remotely Sensed Estimation of Primary Production. *Remote Sensing of Environment* **71**:43-55.
- Oosterheld, M. 1992. Effect of Defoliation Intensity on Aboveground and Belowground Relative Growth Rates. *Oecologia* **92**:313-316.
- Oosterheld, M., R. Aragón, G. Grigera, M. Oyarzábal, y M. Semmartin. 2005. ¿Cómo deben percibir la heterogeneidad quienes manejan la vegetación de los agroecosistemas? El caso de la Pampa Deprimida. Páginas 131-144 en M. Oosterheld, M. Aguiar, C. Ghera, y J. Paruelo, editores. La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas. Un homenaje a Rolando León. Facultad de Agronomía, UBA, Buenos Aires.
- Oosterheld, M., C. Di Bella, y K. Herdiles. 1998. Relation between NOAA-AVHRR satellite data and stocking rate of rangelands. *Ecological applications* **8**:207-212.
- Oosterheld, M., J. Loreti, M. Semmartin, y J. Paruelo. 1999. Grazing, fire, and climate effects on primary productivity of grasslands and savannas. Páginas 287-306 en L. Walker, editor. *Ecosystems of disturbed ground*. Elsevier, Amsterdam.
- Oosterheld, M., y S. J. McNaughton. 1991. Effect of stress and time for recovery on the amount of compensatory growth after grazing. *Oecologia* **85**:305-313.
- Oosterheld, M., O. E. Sala, y S. J. McNaughton. 1992. Effect of Animal Husbandry on Herbivore-Carrying Capacity at a Regional Scale. *Nature*. **356**:234-236.
- Olofsson, P., y L. Eklundh. 2007. Estimation of absorbed PAR across Scandinavia from satellite measurements. Part II: Modeling and evaluating the fractional absorption. *Remote Sensing of Environment* **110**:240-251.
- Panigrahi, B., y S. N. Panda. 2003. Field test of a soil water balance simulation model. *Agricultural Water Management* **58**:223-240.
- Parsons, A. J., E. L. Leafe, B. Collet, P. D. Penning, y J. Lewis. 1983a. The physiology of grass production under grazing. 2. Photosynthesis, crop growth and animal intake of continuously-grazed swards. *Journal of Applied Ecology* **20**:129-139.
- Parsons, A. J., E. L. Leafe, B. Collet, y W. Stiles. 1983b. The physiology of grass production under grazing. 1. Characteristics of leaf and canopy photosynthesis of continuously-grazed swards. *Journal of Applied Ecology* **20**:117-126.
- Parsons, A. J., y P. D. Penning. 1988. The effect of the duration of regrowth on photosynthesis, leaf death and the average rate of growth in a rotationally grazed sward. *Grass and Forage Science* **43**:15-28.
- Paruelo, J., W. Lauenroth, y P. Roset. 2000a. Estimating aboveground plant biomass using a photographic technique. *Journal of Range Management* **53**:190-193.
- Paruelo, J., M. Oosterheld, C. Di Bella, M. Arzadum, J. Lafontaine, M. Cahuepé, y C. Rebella. 2000b. Estimation of primary production of subhumid rangelands from remote sensing data. *Applied Vegetation Science* **3**:189-195.
- Peri, P. L., D. L. McNeil, D. J. Moot, A. C. Varella, y R. J. Lucas. 2002. Net photosynthetic rate of cocksfoot leaves under continuous and fluctuating shade conditions in the field. *Grass and Forage Science* **57**:157-170.
- Peri, P. L., D. J. Moot, y D. L. McNeil. 2003. A canopy photosynthesis model to predict the dry matter production of cocksfoot pastures under varying temperature, nitrogen and water regimes. *Grass and Forage Science* **58**:416-430.
- Phillips, C. J. C. 2001. *Principles of Cattle Production*. CABI Publishing, Oxon.

- Piñeiro, G., M. Oesterheld, y J. M. Paruelo. 2006. Seasonal variation of aboveground production and radiation use efficiency of temperate rangelands estimated through remote sensing. *Ecosystems* **9**:1-19.
- Posse, G., M. Oesterheld, y C. Di Bella. 2005. Landscape, soil and meteorological influences on canopy dynamics of northern flooding Pampa grasslands, Argentina. *Applied Vegetation Science* **8**:49-56.
- Potter, C. S., J. T. Randerson, C. B. Field, P. A. Matson, P. M. Vitousek, H. A. Mooney, y S. A. Klooster. 1993. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Geochemistry Cycles* **7**:811-841.
- Rearte, D. 2007. La Producción de Carne en Argentina. INTA, Buenos Aires.
- Reeves, M. C., J. C. Winslow, y S. W. Running. 2001. Mapping Weekly Rangeland Vegetation Productivity Using MODIS Algorithms. *Journal of Range Management* **54**:90-105.
- Reeves, M. C., M. Zhao, y S. W. Running. 2006. Applying improved estimates of MODIS productivity to characterize grassland vegetation dynamics. *Rangeland Ecology & Management* **59**:1-10.
- Ruimy, A., P. G. Jarvis, D. Baldocchi, y B. Saugier. 1995. CO₂ fluxes over plant canopies and solar radiation: a review. *Advances in Ecological Research* **26**:2-68.
- Ruimy, A., y B. Saugier. 1994. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research* **99**:5263-5283.
- Running, S., P. Thornton, R. Nemani, y J. Glassy. 2000. Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system. Páginas 44-57 en O. Sala, R. Jackson, y H. Mooney, editores. *Methods in Ecosystem Science*. Springer-Verlag, New York.
- Running, S. W., y R. R. Nemani. 1988. Relating seasonal patterns of the AVHRR vegetation index to simulated photosynthesis and transpiration of forests in different climates. *Remote Sensing of Environment* **24**:347-367.
- Running, S. W., R. R. Nemani, F. A. Heinsch, M. Zhao, M. Reeves, y H. Hashimoto. 2004. A Continuous Satellite-Derived Measure of Global Terrestrial Primary Production. *Bioscience* **54**:547-560.
- Russell, G., P. G. Jarvis, y J. L. Monteith. 1989. Absorption of radiation by canopies and stand growth. Páginas 21-39 en G. Russell, B. Marshall, y P. G. Jarvis, editores. *Plant Canopies: Their Growth, Form and Function*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Sala, O., V. Deregibus, T. Schlichter, y H. Alippe. 1981. Productivity dynamics of a native temperate grassland in Argentina. *Journal of Range Management* **34**:48-51.
- Sala, O. E., y A. T. Austin. 2000. Methods of Estimating Aboveground Net Primary Productivity. Páginas 31-43 en O. Sala, R. Jackson, H. Mooney, y R. Howarth, editores. *Methods in Ecosystem Science*. Springer, New York.
- Sala, O. E., W. J. Parton, L. A. Joyce, y W. K. Lauenroth. 1988. Primary Production of the Central Grassland Region of the United States. *Ecology* **69**:40-45.
- Sanderson, M. A., C. A. Rotz, S. W. Fultz, y E. B. Rayburn. 2001. Estimating Forage Mass with a Commercial Capacitance Meter, Rising Plate Meter, and Pasture Ruler. *Agronomy Journal* **93**:1281-1286.
- Saseendran, S. A., L. R. Ahuja, M. L., D. Timlin, C. O. Stöckle, B. K. J., y G. Hoogenboom. 2008. Current water deficit Stress Simulations in Selected Agricultural System Models. Páginas 39-58 en L. R. Ahuja, V. R. Reddy, S. A. Saseendran, y Qiang Yu, editores. *Response of Crops to Limited Water: Understanding and Modeling Water Stress Effects on Plant Growth Processes*. American Society of Agronomy, Madison.
- Schwinning, S., y A. Parsons. 1999. The stability of grazing systems revisited: spatial models and the role of heterogeneity. *Functional Ecology* **13**:737-747.
- Seelan, S. K., S. Laguet, G. M. Casady, y G. A. Seielstad. 2003. Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. *Remote Sensing of Environment* **88**:157-169.
- Sellers, P. J. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing* **6**:1335-1372.
- Sellers, P. J., S. O. Los, C. J. Tucker, C. O. Justice, D. A. Dazlich, G. J. Collatz, y D. A. Randall. 1996. A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for Atmospheric GCMS. Part II: The

- Generation of Global Fields of Terrestrial Biophysical Parameters from Satellite Data. *Journal of Climate* **9**:706-737.
- Sinclair, T. R., y T. Horie. 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. *Crop Science* **29**:90-98.
- Sinclair, T. R., y R. C. Muchow. 1999. Radiation Use Efficiency. *Advances in Agronomy* **65**:215-265.
- Sinclair, T. R., T. Shiraiwa, y G. L. Hammer. 1992. Variation in Crop Radiation-Use Efficiency with Increased Diffuse Radiation. *Crop Science* **32**:1281-1284.
- Sinoquet, H., B. Mouliat, F. Gastal, R. Bonhomme, y C. Varlet-Grancher. 1990. Modeling the radiative balance of the components of a binary mixed canopy: application to a white clover/tall fescue mixture. *Acta Oecologica* **11**:469-486.
- Soussana, J. F., y A. Oliveira Machado. 2000. Modelling the dynamics of temperate grasses and legumes in cut mixtures. Páginas 169-190 en G. Lemaire, J. Hodgson, A. Moraes, P. C. d. F. Cavalho, y C. Nabinger, editores. *Grassland ecophysiology and grazing ecology*. CABI, New York.
- Stöckle, C. O., M. Donatelli, y R. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* **18**:289-307.
- Stöckle, C. O., A. R. Kemanian, y C. Kremer. 2008. On the Use of radiation- and Water-Use Efficiency for Biomass Production Models. Páginas 39-58 en L. R. Ahuja, V. R. Reddy, S. A. Saseendran, y Qiang Yu, editores. *Response of Crops to Limited Water: Understanding and Modeling Water Stress Effects on Plant Growth Processes*. American Society of Agronomy, Madison.
- Stuth, J. W., W. T. Hamilton, J. C. Conner, D. P. Sheehy, y M. J. Baker. 1993. Decision support systems in the transfer of grassland technology. Páginas 234-242 en M. G. Baker, editor. *Grassland for Our World*. Sir Publishing, Wellington.
- Tan, B., C. E. Woodcock, J. Hu, P. Zhang, M. Ozdogan, D. Huang, W. Yang, Y. Knyazikhin, y R. B. Myneni. 2006. The impact of gridding artifacts on the local spatial properties of MODIS data: Implications for validation, compositing, and band-to-band registration across resolutions. *Remote Sensing of Environment* **105**:98-114.
- Teague, W., S. Dowhower, W. Pinchak, D. Tolleson, y L. Hunt. 1996. Increasing utilization efficiency of continuously stocked Old World bluestem pasture. *Journal of Range Management* **49**:535-540.
- Teixeira, E., D. Moot, H. Brown, y K. Pollock. 2007. How does defoliation management impact on yield, canopy forming processes and light interception of lucerne (*Medicago sativa* L.) crops? *European Journal of Agronomy* **27**:154-164.
- Teixeira, E. I., D. J. Moot, y H. E. Brown. 2008. Defoliation frequency and season affected radiation use efficiency and dry matter partitioning to roots of lucerne (*Medicago sativa* L.) crops. *European Journal of Agronomy* **28**:103-111.
- Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* **8**:127-150.
- Turner, D. P., W. D. Ritts, W. B. Cohen, T. K. Maeirsperger, S. T. Gower, A. A. Kirschbaum, S. W. Running, M. Zhao, S. C. Wofsy, A. L. Dunn, B. E. Law, J. L. Campbell, W. C. Oechel, H. J. Kwon, T. P. Meyers, E. E. Small, S. A. Kurc, y J. A. Gamon. 2005. Site-level evaluation of satellite-based global terrestrial gross primary production and net primary production monitoring. *Global Change Biology* **11**:666-684.
- Turner, D. P., S. Urbanski, D. Bremer, S. C. Wofsy, T. Meyers, S. T. Gower, y M. Gregory. 2003. A cross-biome comparison of daily light use efficiency for gross primary production. *Global Change Biology* **9**:383-395.
- Vallentine, J. F. 2001. *Grazing Management*, 2^{da} edición. Academic Press, San Diego.
- van Leeuwen, W. J. D., B. J. Orr, S. E. Marsh, y S. M. Herrmann. 2006. Multi-sensor NDVI data continuity: Uncertainties and implications for vegetation monitoring applications. *Remote Sensing of Environment* **100**:67-81.
- Walker, J. 1995. Viewpoint: Grazing management and research now and in the next millennium. *Journal of Range Management* **48**:350-357.

- Wardlow, B. D., S. L. Egbert, y J. H. Kastens. 2007. Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains. *Remote Sensing of Environment* **108**:290-310.
- Weiss, M., F. Baret, S. Garrigues, y R. Lacaze. 2007. LAI and fAPAR CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 2: validation and comparison with MODIS collection 4 products. *Remote Sensing of Environment* **110**:317-331.
- Xiao, X., Q. Zhang, B. Braswell, S. Urbanski, S. Boles, S. Wofsy, I. Moore, Berrien, y D. Ojima. 2004. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. *Remote Sensing of Environment* **91**:256-270.
- Xiao, X., Q. Zhang, S. Saleska, L. Hutya, P. De Camargo, S. Wofsy, S. Frolking, S. Boles, M. Keller, y B. Moore III. 2005. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. *Remote Sensing of Environment* **94**:105-122.
- Zhang, B., I. Valentine, P. Kemp, y G. Lambert. 2006. Predictive modelling of hill-pasture productivity: integration of a decision tree and a geographical information system. *Agricultural systems* **87**:1-17.